

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Civile

Modellazione numerica di una rete di drenaggio urbano

Candidato: Francesco Loddo

Relatore: Fulvio Boano

Matricola: 279222

Correlatore: Federico Raviola

# SOMMARIO

1. Introduzione	6
1.1 Premesse e obbiettivi	6
1.2 Struttura della tesi	7
2. Generalità del caso di studio	9
2.1 Descrizione della rete di drenaggio del comune di Torino	9
2.2 Descrizione della rete oggetto di studio	10
2.2.1 Inquadramento generale	10
2.2.2 Collegamenti con l'esterno e sfoci	13
2.2.3 Collettori	14
3. Monitoraggio	16
3.1 Strumenti di misura disponibili	16
3.2 Dati disponibili	18
3.2.1 Pluviometri	18
3.2.2 Misuratore di livello e velocità	20
4. Modellazione	22
4.1 Motore di calcolo adottato	22
4.1.1 Oggetti di un modello SWMM	22
4.1.2 Calcolo dei deflussi	24
4.1.3 Calcolo in rete	26
4.1.4 Calcolo dell'infiltrazione	26
4.2 Modellazione della rete	28
4.2.1 Pozzetti e collettori	29
4.2.2 Modellazione della sezione del collettore strumentato	35
4.2.3 Sottobacini	36

4.3 Verifiche richieste a SMAT	
5. Modellazione della precipitazione	44
5.1 Modellazione della precipitazione di progetto	
5.1.1 Evento di pioggia con ietogramma ideale di durata oraria	46
5.1.2 Evento di pioggia con ietogramma ideale di 10 minuti di durata	
5.2 Modellazione delle precipitazioni reali	
5.2.1 Unico ietogramma su tutto il bacino	50
5.2.2 Interpolazione lineare delle intensità misurate	52
6. Prime simulazioni	53
6.1 Evento di durata oraria associato ad un tempo di riorno di 5 anni	54
6.1.1 Grado di riempimento dei collettori	54
6.1.2 Analisi dei punti con alto grado di riempimento	56
6.2 Evento di durata di 10 minuti associato ad un tempo di riorno di 5 anni	59
6.2.1 Grado di riempimento dei collettori	59
6.2.2 Esondazioni	61
6.2.3 Analisi dei punti critici	63
6.3 Osservazioni	70
7. Simulazione con eventi di pioggia reali	71
7.1 Unico ietogramma su tutto il bacino	71
7.1.1 Evento del 25/07/2021	74
7.1.2 Evento del 26/07/2021	76
7.1.3 Evento del 27/07/2021	79
7.1.4 Evento del 06/09/2021	82
7.2 Interpolazione lineare delle intensità misurate	84
7.2.1 Evento del 25/07/2021	85

7.2.2 Evento del 26/07/20218	7
7.2.3 Evento del 27/07/20218	9
7.2.4 Evento del 06/09/20219	1
7.2.5 Osservazioni9	3
8. Calibrazione del modello9	4
8.1 Calibrazione con eventi interpolati linearmente9	4
8.1.1 Evento del 25/07/20219	5
8.1.2 Evento del 26/07/20219	6
8.1.3 Evento del 27/07/20219	7
8.1.4 Evento del 06/09/20219	8
8.1.5 Osservazioni9	9
8.2 Ietogrammi assegnati su aree di influenza dei pluviometri9	9
8.2.1 Evento del 25/07/202110	1
8.2.2 Evento del 26/07/202110	2
8.2.3 Evento del 27/07/202110	3
8.2.4 Evento del 06/09/202110	4
8.2.5 Osservazioni10	4
8.3 Calibrazione del modello con ietogrammi assegnati su aree di influenza dei pluviomete	ri 5
9. Validazione delle misure10	7
9.1 Calcolo dei coefficienti di deflusso sperimentali10	7
9.1.1 Evento del 25/07/202110	8
9.1.2 Evento del 26/07/202111	0
9.1.3 Evento del 27/07/202111	1
9.1.4 Evento del 06/09/202111	2

9.1.5 Osservazioni	
9.2 Coefficienti di deflusso simulati	
10. Conclusioni	
Bibliografia e sitografia	

# 1. Introduzione

#### 1.1 Premesse e obbiettivi

La presente tesi si pone l'obbiettivo di studiare una rete di drenaggio urbano delle acque meteoriche. Il problema affrontato ricopre fondamentale rilevanza nella società odierna, in quanto le infrastrutture fognarie raccolgono e trasportano le acque presenti nei centri abitati. Il loro ruolo è quindi imprescindibile per fini legati alla sicurezza: come afferma un rapporto dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) riguardo gli indicatori del clima in Italia, negli ultimi anni l'intensità registrata delle precipitazioni ha subito drastici aumenti e gli eventi di pioggia sembrano essere meno frequenti ma più estremi. Proprio per questo è fondamentale studiare le infrastrutture fognarie, progettate in passato a partite da eventi precipitativi e tenori di vita molto diversi da quelli attuali. In questo modo, è possibile comprenderne le criticità e apportarne miglioramenti, riducendo il rischio di alluvioni e limitando i conseguenti danni a persone e beni immobili.

In questa tesi verrà analizzata la rete di drenaggio delle acque meteoriche che serve un bacino nel territorio comunale di Torino. Tale lavoro si inguadra nella convenzione tra il Politecnico di Torino e SMAT (Società Metropolitana Acque Torino), ovvero un'azienda che opera nel campo del servizio idrico integrato responsabile della gestione delle fonti di approvvigionamento idrico, degli impianti di potabilizzazione e distribuzione di acqua potabile e delle reti di raccolta, depurazione e riuso dei reflui urbani del comune di Torino. Questa collaborazione è stata stipulata nel 2020 per studiare, mediante modelli idraulici, le criticità presenti nella rete di drenaggio di Torino. Risulta molto importante condurre analisi aggiornate, in quanto l'ultimo studio alla scala della città risale al 1970 sempre ad opera del Politecnico di Torino. Considerandone l'epoca, questa attività fu condotta senza l'ausilio di modelli numerici ed inoltre, negli ultimi 50 anni la crescente urbanizzazione ed il cambiamento dei regimi di pioggia ha reso il sistema di drenaggio non più efficiente. Nel corso degli anni, da tutto ciò sono scaturiti diversi allagamenti e problemi in varie zone della città, portando SMAT a promuovere un nuovo studio finalizzato a testare la rete e trovarne i punti critici. L'attività svolta dal Politecnico e la necessità di raccogliere informazioni adeguate, è inoltre un'occasione per SMAT di aggiornare le proprie cartografie ed avere dei modelli idraulici da usare in futuro per lo sviluppo della rete.

Il Politecnico di Torino sta realizzando la digitalizzazione e correzione dei dati disponibili sulle reti di drenaggio raccolti dalla stessa SMAT e sviluppa modelli numerici idraulici in grado di riprodurre il comportamento delle reti comunali. Si arriva così alla costruzione di un archivio digitale contenente informazioni su tutta l'opera idraulica che serve il territorio comunale. Proprio a tale proposito la rete di drenaggio è stata suddivisa in vari bacini di competenza che vengono analizzati e studiati separatamente. Come accennato in precedenza, il presente lavoro di tesi verte su uno di questi bacini, denominato "Bacino P": in particolare, si concentra sulla modellazione digitale della rete a partire da dati noti relativi a pozzetti e collettori e sullo studio del suo comportamento a eventi di pioggia di diversa intensità e durata attraverso simulazioni numeriche.

#### 1.2 Struttura della tesi

Inizialmente l'attenzione sarà posta sui caratteri generali del bacino al fine di comprenderne la morfologia oltre alle grandezze geometriche ed idrauliche dei componenti della rete. Sarà importante inoltre capire i territori limitrofi, in modo da immaginare il percorso seguito dalle acque e comprendere l'influenza delle connessioni esterne. In seguito, verranno elencate le metodologie e le ipotesi adottate finalizzate alla costruzione del modello idraulico della rete, a partire dai dati disponibili fino alla definizione dei parametri idraulici che governano il comportamento dell'opera. Sarà fondamentale studiare le informazioni di partenza per individuare eventuali incongruenze con lo stato di fatto. Qualora si dovessero riscontrare carenze eccessive nella disponibilità dei dati, come quote incognite dei pozzetti o dimensioni sconosciute delle sezioni dei collettori in lunghi tratti di rete, il problema verrà segnalato a SMAT che provvederà a comunicare le informazioni corrette dopo aver svolto le opportune verifiche.

Una volta corretti ed ordinati i dati, per completare la modellazione sarà necessario definire diversi fattori idraulici, come i coefficienti di permeabilità del terreno. A quel punto si potrà procedere con le simulazioni numeriche del comportamento della rete sottoposta ad eventi di pioggia sia ideali, costruiti sulla base di studi statistici, che reali, misurati da pluviometri dei quali si ha disponibilità di registrazioni passate. Le simulazioni porteranno all'ottenimento di informazioni dalle quali sarà possibile individuare i punti più critici della rete. Avrà grande rilevanza la possibilità di confrontare i risultati simulati numericamente con le misure registrate dagli strumenti presenti nel bacino, in particolare un misuratore di livello e velocità collocato in un collettore. Da tali paragoni sarà possibile calibrare i parametri di infiltrazione del modello con lo scopo di rendere i risultati del modello il più possibile aderenti al reale comportamento della rete.

# 2. Generalità del caso di studio

#### 2.1 Descrizione della rete di drenaggio del comune di Torino

La rete delle fognature di Torino si è sviluppata, nella forma attuale, a partire dalla fine dell'800, quando il Consiglio Comunale approvò il progetto esecutivo con due reti distinte (bianca e nera) nel 1893, a servizio di circa 16 km<sup>2</sup> di area urbana (corrispondenti all'area interclusa dalla cinta daziaria). La rete nera venne dimensionata considerando un apporto di 200 litri/giorno per ogni abitante, da smaltirsi in 12 ore. Per quanto riguarda la rete bianca, invece, a seguito di una valutazione costibenefici si fece riferimento ad una intensità di pioggia pari a 60 mm/h, senza considerare riduzioni relative al differimento temporale dei flussi (corrivazione o l'effetto di invasi). Compatibilmente con le caratteristiche delle pavimentazioni dell'epoca, venne considerato che 1/3 della precipitazione venisse assorbita dal terreno, quindi il contributo specifico di afflusso in fognatura risultò pari a 40 mm/h.

Si nota che tale intensità non corrisponde ai massimi valori registrati. il 10/07/1880, ad esempio, l'intensità di pioggia raggiunse i 120 mm/h, come menzionato nella relazione dell'ingegnere

Francesetti del 1891 per la Commissione Municipale:

*"Il 10 luglio 1880, per diciotto minuti consecutivi caddero 2 millimetri di pioggia al minuto* [...]; *il 4 agosto 1884, per un'ora e venticinque minuti la pioggia seguitò colla intensità media di 52 millimetri all'ora. A Torino nella notte del 6 maggio 1887 caddero 73 millimetri di pioggia; il 15 luglio dello stesso anno per tre quarti d'ora la pioggia presentò l'intensità di 56 mm/h".* 

Il parametro di progetto di 40 mm/h (111  $l/_{s \cdot ha}$ ) viene utilizzato anche per una prima implementazione della rete, come citato in occasione di una progettazione di un collettore Snia del 1935: esso fu dimensionato considerando intensità di 110  $l/_{s \cdot ha}$ , evidente approssimazione di 111  $l/_{s \cdot ha}$ .

Tuttavia, al di là dei suddetti parametri, va considerato che fino a quasi gli ultimi anni del '900 le tubazioni della rete fognaria di Torino sono state realizzate in opera. La conseguente necessità di operare all'interno delle tubazioni stesse da parte delle maestranze ha imposto dimensioni minime che prescindono dal calcolo idraulico. Per questa ragione il calcolo idraulico compare solamente in rare occasioni nella documentazione progettuale. Inoltre, risulta molto complesso calcolare il carico della rete di fognatura, in quanto il sistema non è *ad albero*, ma presenta diffusi collegamenti *a maglia*. In reti come questa la ripartizione dei bacini che alimentano un tratto di fognatura dipende dalla specifica pioggia e risulta condizionata dai dettagli geometrici. Si ritiene, pertanto, che l'effettivo livello di "carico" delle fognature possa essere stimato ragionevolmente solo sulla base delle risultanze dell'attività manutentiva (osservazioni, segnalazioni...) da parte dell'Ente gestore (SMAT).

## 2.2 Descrizione della rete oggetto di studio

#### 2.2.1 Inquadramento generale

Ai fini del progetto di modellazione della rete di drenaggio del comune di Torino condotto dal Politecnico, l'area di studio è stata suddivisa in 21 bacini, evidenziati in figura 2.1.



Figura 2.1 – Suddivisione in bacini della rete di drenaggio delle acque meteoriche del comune di Torino

L'area oggetto di studio è stata denominata *"Bacino P"* nella catalogazione delle reti di drenaggio urbano dell'area di Torino. Si trova a Nord-Est del territorio comunale, nei pressi di Corso Grosseto e copre un'area complessiva di 4.40 km<sup>2</sup>, come mostrato nelle figure 2.2 e 2.3.



Figura 2.2 - Collocazione del bacino oggetto di studio nel territorio comunale di Torino



Figura 2.3 – Inquadramento del bacino oggetto di studio e Vie principali

La rete si sviluppa in un territorio pianeggiante: la quota del punto più elevato è pari a 237 m s.l.m, mentre il punto più depresso ha circa quota 213 m s.l.m. L'area del bacino si sviluppa tra i fiumi Stura e Po, che ne delimitano l'estensione a Nord e Sud-Est. Il confine Sud-Ovest è contraddistinto da una trincea ferroviaria in disuso. L'area servita dalla rete è principalmente urbanizzata, ma non mancano le aree verdi. In particolare, nella zona bagnata dalla Stura si estende il *Parco dell'Arrivone*, per una superficie di 0.6 km<sup>2</sup>. Tale parco risulta essere l'area verde più grande del bacino, ma non è il solo. Infatti, nella zona limitrofa al Po si sviluppa il *Parco della Confluenza*, mentre ad Ovest il bacino include in parte il *Parco Rubbertex* ed il *Parco Sempione Est*. Sono presenti anche alcuni viali alberati (come Corso Taranto) e numerosi campi sportivi che aumentano il coefficiente di permeabilità.

# 2.2.2 Collegamenti con l'esterno e sfoci

La rete in esame riceve portata dall'esterno in 5 punti distribuiti sul confine Ovest (via Reiss Romoli e corso Vercelli) e a Sud (via Sempione e corso Regio Parco), mentre non è collegata al resto della fognatura comunale in prossimità di corso Grosseto e Corso Venezia e sul bordo Sud-Ovest a causa della trincea ferroviaria.

Come facilmente intuibile, gli sfoci della rete scaricano acqua nella Stura e nel Po, ma è presente anche uno sfocio in un altro settore della rete urbana in prossimità della trincea ferroviaria (via Giovanni Paisiello), come indicato nella figura 2.4:



Figura 2.4 - Collettori, pozzetti e connessioni esterne presenti nella rete

# 2.2.3 Collettori

Fatta eccezione per un breve tratto realizzato in polipropilene sito in via Gabriele Rossetti, tutte le condotte che costituiscono la rete oggetto di studio sono in calcestruzzo. Le sezioni più usate sono ovoidali 700x1200 e 600x900 e la maggior parte dei tratti hanno tracciato singolo. I tratti più importanti si diramano in direzione Sud-Nord su corso Vercelli, corso Giulio Cesare e Via Bologna, dove l'acqua viene scaricata nella Stura, e in direzione Est-Ovest lungo corso Taranto e via Sandro Botticelli, come indicato nella figura 2.5:



Figura 2.5 – Collettori principali della rete

Le sezioni dei collettori più grandi si trovano su corso Vercelli, corso Taranto e via Sandro Botticelli, dove allo sfocio sono collocate condotte circolari di diametro pari a 2000 mm, partendo rispettivamente da sezioni ovoidali 800x1400 e ovoidali 700x1200. In corso Giulio Cesare, invece, le sezioni inizialmente sono comuni ovoidali 600x900, per poi diventare ovoidali 1500x1500 allo sfocio. Nella figura 2.6 sono evidenziate le sezioni più ricorrenti e le sezioni più grandi:



Figura 2.6 – Sezioni principali della rete

# 3. Monitoraggio

Gli eventi precipitativi nella zona di Torino sono monitorati da diversi pluviometri sparsi nel territorio. In particolare, SMAT ha installato 20 pluviometri che si affiancano alla più vecchia rete di ARPA, che conta 5 stazioni attiva. Come descritto nel paragrafo 3.1, due di questi ricadono all'interno dell'area oggetto di studio. Inoltre, all'interno di alcuni collettori sono presenti misuratori di livello e velocità, dai cui dati è possibile ricavare la portata. I dati raccolti saranno punti di partenza e arrivo dell'attività di tesi, il cui obbiettivo consiste nel testare un modello numerico virtuale della rete: confrontando i risultati ottenuti simulando il comportamento della rete sottoposta ad eventi realmente accaduti con le misure registrate all'interno dei collettori forniranno il grado di attendibilità del modello.

Una volta ultimata la modellazione sulla base dalle informazioni su pozzetti e collettori campionate da SMAT, dai dati misurati dai pluviometri disponibili sul bacino verranno ricostruiti i relativi ietogrammi su tutto il bacino. In questo modo sarà possibile simulare la risposta della rete, analizzare i punti più critici e confrontare la portata ed il rispettivo volume in un certo punto con quello registrato durante lo stesso evento.

#### 3.1 Strumenti di misura disponibili

Nell'area servita dalla rete di drenaggio sono presenti due pluviometri, denominati *PLUTO10* e *PLUTO20* e un misuratore di livello e velocità. Come si può notare dalla figura 3.1, il pluviometro *PLUTO10* occupa una posizione centrale nel bacino, adiacente a corso Giulio Cesare, mentre il pluviometro *PLUTO20* si trova ad Est, nei pressi di via Emilio Salgari. Il misuratore di portata, invece, si trova a meno di 900 metri più a valle di *PLUTO10*, non lontano dallo sfocio nella Stura. Viste le posizioni di questi due strumenti, in futuro sarà utile combinare i dati campionati per testare e validare la rete modellata numericamente.



Figura 3.1 – Posizione degli strumenti di misura nel bacino oggetto di interesse

#### 3.2 Dati disponibili

### 3.2.1 Pluviometri

I pluviometri installati nell'area del bacino caso di studio misurano le intensità di pioggia in mm/h ogni 15 minuti. Di conseguenza, si avranno 4 letture ogni ora. La disponibilità dei dati raccolti si limita tra l'estate e l'inizio dell'autunno del 2021, nell'arco di tempo che va dal 19 luglio al 2 novembre per il pluviometro PLUTO10 e dal 19 luglio al 19 ottobre per il pluviometro PLUTO20.

Gli eventi più significativi sono una decina, registrati il 25, 26, 27 e 31 luglio, il primo e 31 agosto ed il 6, 18 e 19 settembre. La durata di tali eventi è variabile, e può insistere da meno di un'ora fino a 7 ore, come accade nell'evento del 25 luglio, riportato nella tabella 3.1 e nella figura 3.2:

Data e ora	i [mm/h] PLUTO10	i [mm/h] PLUTO20
25/07/2021 18:30	0	0
25/07/2021 18:45	0	0.8
25/07/2021 19:00	0	0
25/07/2021 19:15	0	0.8
25/07/2021 19:30	2.4	27.2
25/07/2021 19:45	18.4	46.4
25/07/2021 20:00	30.4	12.8
25/07/2021 20:15	26.4	4
25/07/2021 20:30	0.8	4
25/07/2021 20:45	0.8	8
25/07/2021 21:00	0	12.8
25/07/2021 21:15	9.6	8.8
25/07/2021 21:30	23.2	40.8
25/07/2021 21:45	8.8	13.6
25/07/2021 22:00	1.6	3.2
25/07/2021 22:15	0	0
25/07/2021 22:30	0	0.8
25/07/2021 22:45	0	0
25/07/2021 23:00	0.8	0
25/07/2021 23:15	0	0

Tabella 3.1 – Intensità di pioggia misurate dai due pluviometri presenti nel bacino oggetto di studio il 25 luglio 2021



Figura 3.2 – letogramma misurato dai due pluviometri presenti nel bacino oggetto di studio il 25 luglio 2021

La massima intensità è stata misurata da PLUTO20 alle 04:15 del 31 agosto 2021, ed è pari a 96.8 mm/h. I dati di questo evento sono riportati nella tabella 3.2 e nella figura 3.3:

Tabella	3.2	– In	tensità	di	piog	gia	mi	sura	ate	dai	due	plu	viometri	presenti	nel	bacino
												-				

Data e ora	i [mm/h] PLUTO10	i [mm/h] PLUTO20
31/08/2021 03:30	0	0
31/08/2021 03:45	0.8	7.2
31/08/2021 04:00	3.2	8
31/08/2021 04:15	65.6	96.8
31/08/2021 04:30	4.8	54.4
31/08/2021 04:45	0	0.8
31/08/2021 05:00	0	0
31/08/2021 05:15	0	0
31/08/2021 05:30	0	0.8
31/08/2021 05:45	0	0

oggetto di studio il 31 agosto 2021



Figura 3.3 – Ietogramma misurato dai due pluviometri presenti nel bacino oggetto di studio il 31 agosto 2021

# 3.2.2 Misuratore di livello e velocità

Il misuratore di livello e velocità ha fornito dati nell'estate del 2021, ma mancano registrazioni in alcuni periodi. Ad esempio, non si hanno letture disponibili tra il 29 luglio e il 2 settembre; di conseguenza, non è possibile conoscere il corrispettivo valore di portata transitante in rete durante gli eventi accaduti in questo arco temporale, compresa la precipitazione del 31 agosto nella quale si registrava la massima intensità.

Il livello viene misurato in mm e la velocità in mm/h; da questi due valori viene estrapolata la portata in l/s. In questo caso, le letture vengono effettuate ogni tre minuti. Il massimo tirante registrato si attesta su un'altezza di 974 mm, lettura effettuata il 25 luglio 2021 alle 20:27, quasi 45 minuti dopo il picco di intensità misurato dal pluviometro PLUTO20. Durante lo stesso evento, alle 20:12, si registra anche la massima portata, pari a 2179 l/s, come si può notare dalla figura 3.4:



Figura 3.4 – Portata registrata dal misuratore di livello e velocità il 25 luglio 2021

# 4. Modellazione

#### 4.1 Motore di calcolo adottato

Per completare la modellazione numerica della rete e svolgere conseguentemente le simulazioni idrauliche è stato usato il software EPA SWMM (Storm Water Management Model). Questo software viene prodotto e sviluppato da Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency (US-EPA). Swmm è stato concepito nel 1971 e nel corso degli anni ha subito continui sviluppi e miglioramenti, fino ad arrivare alla versione usata in questo studio, la 5.2. Questa versione è basata sulla struttura di calcolo di un linguaggio C++. Un'interfaccia grafica ne facilita l'utilizzo sia in fase di costruzione della rete e dei relativi parametri, sia nella interpretazione e gestione dei dati ricavati dalle simulazioni.

SWMM è in grado di simulare il movimento della precipitazione meteorica dalla superficie del bacino alla rete dei canali e condotte che costituiscono il sistema di drenaggio urbano. Grazie alla risoluzione e integrazione numerica in forma completa delle equazioni di De Saint Venant, offre la possibilità di compiere calcoli e simulazioni di tipo idraulico su una rete di canali o condotte, sollecitata da fenomeni meteorici o da ingressi di natura diversa.

#### 4.1.1 Oggetti di un modello SWMM

Swmm modella la rete di drenaggio come un insieme di vari oggetti. La rete di drenaggio è composta da nodi (junctions) e collettori (conduits). I nodi sono puntiformi, mentre i collettori sono oggetti lineari che collegano due nodi. Le precipitazioni vengono definite attraverso l'attribuzione dei Rain Gage, i quali forniscono i dati di pioggia sui bacini. Questi possono essere inseriti manualmente in SWMM attraverso appositi editor, oppure possono essere caricati da un file di testo esterno. Le principali proprietà in input dei Rain Gage comprendono informazioni relative all'intensità o al volume della pioggia e l'intervallo di registrazione dei dati. La variabilità spaziale della precipitazione e della capacità di infiltrazione del terreno è realizzata discretizzando l'area di interesse in sottobacini (subcatchments), porzioni di territorio che ricevono l'evento di pioggia schematizzato dal Rain Gage associato e generano deflusso che entra in un nodo o in un altro sottbacino.

Gli oggetti che compongono un modello SWMM sono rappresentati in figura 4.1:



Figura 4.1 – Schema concettuale degli oggetti schematizzati in SWMM che compongono la rete di drenaggio

I principali parametri contenuti dai nodi che andranno importati nel modello sono i seguenti:

- identificativo del pozzetto;
- coordinate planimetriche e altimetriche.

I punti in cui la rete scarica acqua all'esterno vengono schematizzati dagli Outfall. Questi oggetti sono costituiti dagli stessi parametri elencati per i comuni nodi, oltre ad un ulteriore indice che tiene conto delle condizioni al contorno dello sfocio. Nella rete oggetto di studio sono presenti in totale 10 sfoci: 9 di questi scaricano il deflusso nei corsi d'acqua del Po e dalla Stura. In questi casi il tipo di Outfall è stato impostato come "Free". In un caso lo sfocio avviene all'interno di un'altra rete. In questa situazione è stato scelto di usare un Oufall di tipo "Normal", che simula il deflusso di una corrente in un'altra.

Per i collettori andranno invece impostati i seguenti parametri:

- identificativo del collettore;
- sezione;
- lunghezza;
- scabrezza.

La precipitazione nei Rain Gage è definita attraverso la costruzione di una serie temporale (Time Series). Questo strumento permette l'attribuzione di un valore di intensità di pioggia caduta in uno specifico istante temporale definito dall'utente. In questo modo è possibile costruire manualmente gli ietogrammi che potranno essere associati ai vari sottobacini.

I parametri da definire per ogni sottobacino sono invece i seguenti:

- area;
- pendenza media;
- larghezza equivalente del bacino;
- percentuale delle aree impermeabili;
- altezza delle depressioni superficiali nelle aree permeabili ed impermeabili;
- coefficiente di Manning per le superfici permeabili ed impermeabili;
- parametri per il calcolo dell'infiltrazione.

Le definizioni di questi parametri e la loro valutazione sono riportate nel paragrafo 4.4.

# 4.1.2 Calcolo dei deflussi

In SWMM le precipitazioni vengono trasformate in deflussi superficiali attraverso il metodo egli afflussi-deflussi. Il calcolo viene eseguito su ogni sottobacino, che viene schematizzato dal software come un'area rettangolare a pendenza costante e larghezza equivalente a quella del bacino reale. Nella figura 4.2 vengono schematizzati i processi che contribuiscono alla creazione del deflusso in un generico sottobacino:



Figura 4.2 – Schematizzazione dei processi che contribuiscono alla formazione del deflusso in ogni sottobacino

Il sottobacino riceve precipitazione dall'evento di pioggia o eventualmente dallo scioglimento della neve, e parte del volume depositato si infiltra o evapora. La restante porzione di volume potrebbe rimanere confinato nelle depressioni superficiali del suolo di altezza  $d_s$ , che ne impediscono conseguentemente il trasporto. Il volume che non prende parte a questi processi costituisce il deflusso.

Dalla legge di conservazione della massa, l'altezza di acqua depositata sul suolo per unità di tempo è pari alla differenza tra tassi di afflusso e di deflusso sul sottobacino:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q$$

Dove:

- *i* è la precipitazione;
- *e* è il tasso di evaporazione;
- *f* è il tasso di infiltrazione;
- q è deflusso.

SWMM risolve l'equazione calcolando q attraverso la formula empirica di Manning nelle aree sia permeabili che impermeabili di ogni sottobacino.

#### 4.1.3 Calcolo in rete

Il movimento dell'acqua attraverso una rete di drenaggio è governato dalle equazioni di De Saint-Venant, ovvero un sistema di due espressioni: l'equazione di continuità (o della conservazione della massa) e l'equazione di moto.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Equazione di continuità}$$
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot S_f = 0 \quad \text{Equazione di moto}$$

Dove:

- x è coordinata longitudinale (distanza);
- t è il tempo;
- A è l'area trasversale alla corrente;
- *Q* è la portata;
- *H* è il tirante nella condotta;
- *g* è l'accelerazione di gravità;
- $S_f$  è la pendenza motrice.

Queste formulazioni sono valide per correnti a pelo libero gradualmente variate.

La discretizzazione e la risoluzione delle equazioni di De Saint-Venant viene svolta dal modulo computazionale di SWMM denominato Extran, in modo da calcolare l'evoluzione temporale della portata in ogni collettore.

# 4.1.4 Calcolo dell'infiltrazione

Per quanto riguarda l'infiltrazione, ovvero il processo per cui le acque meteoriche cadute al suolo su aree permeabili penetrano attraverso la superficie del terreno verso gli strati inferiori, SWMM offre tre possibilità di calcolo: equazioni di Horton, metodo di Green-Ampton e metodo del Curve Number. In questo studio è stato adottato il metodo di Horton. Questo metodo si basa su osservazioni empiriche che dimostrano che l'infiltrazione nel caso di una precipitazione sufficientemente prolungata diminuisce esponenzialmente da un tasso iniziale massimo ad un tasso minimo. Ciò avviene in quanto, via via che l'evento si sviluppa, il terreno diventa sempre più saturo ed è in grado di assorbire meno acqua. Vale la seguente legge:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t}$$

Dove:

- *f*(*t*) è la capacità di infiltrazione al tempo di *t*;
- $f_0$  è il valore massimo iniziale di f;
- $f_c$  è il valore costante finale di f a suolo saturo;
- k è un parametro dipendente dalle caratteristiche del suolo che definisce quanto rapidamente scende l'intensità nel tempo;
- *t* è la durata dell'evento di pioggia.

Nella pratica, i tre coefficienti di infiltrazione presenti nel metodo di Horton sono difficili da trovare. Servirebbe conoscere la velocità del flusso nel suolo. In questo studio sono stati adottati inizialmente parametri di infiltrazione relativi a suoli di riferimento elencati nel 1956 da Soil Conservation Service (SCS), riportati nella tabella 4.1:

Tipo di Suolo	f <sub>0</sub> [mm/h]	f <sub>c</sub> [mm/h]	k [1/h]
Suolo A	250	25.4	2
Suolo B	200	12.7	2
Suolo C	125	6.3	2
Suolo D	76	2.5	2

Tabella 4.1 – Parametri di infiltrazione dei suoli di riferimento definiti nel 1956 dal S.C.S

La maggior parte dei sottobacini sono poco permeabili, a causa del carattere urbanizzato della zona: a queste regioni sono stati assegnati i parametri del suolo C. Ai sottobacini più "verdi", con coefficiente di permeabilità superiore al 50%, sono stati invece assegnati i parametri del suolo A, per simulare una maggiore infiltrazione.

Altri parametri importanti che simulano il comportamento del terreno e sono richiesti da SWMM in ogni sottobacino sono i cosiddetti Depression Storage, ovvero l'altezza delle depressioni superficiali. Rappresentano il volume di acqua per unità di superficie che si accumula nelle depressioni. Di conseguenza, all'aumentare del loro valore aumenta la capacità disponibile nei dislivelli presenti. Sono espressi in millimetri e nelle simulazioni iniziali sono stati adottati i valori riportati nella tabella 4.2:

Tipo di suolo	Depression storage [mm]
permeabile	5
impermeabile	2

Tabella 4.2 – Valori di depression storage adottati

Le simulazioni svolte nei Capitoli 6 e 7 fanno riferimento al modello sviluppato con i suddetti parametri. In seguito, i valori di infiltrazione verranno calibrati confrontando i risultati simulati con i dati registrati dai pluviometri e dal misuratore di livello e velocità a seguito di eventi di pioggia realmente accaduti.

#### 4.2 Modellazione della rete

La rete di drenaggio è stata modellata nel software SWMM, sul quale verranno condotte simulazioni numeriche finalizzate alla valutazione della risposta dell'opera a vari eventi di pioggia. I dati di partenza usati per la modellazione consistono in una serie di shapefile contenenti diverse informazioni sui pozzetti e sui collettori.

Per evitare fraintendimenti sui sistemi di riferimento, tutte le quote vengono riportate in metri sul livello del mare, e viene adottato il sistema di riferimento planimetrico di Roma Monte Mario (EPSG: 3003).

Siccome SWMM non supporta direttamente gli shapefile né un eventuale file gis che li contiene, l'importazione è stata ultimata creando un file di testo leggibile da SWMM. In particolare, le informazioni utili degli shapefile sono state raccolte in tabelle Excel e successivamente convertite nel file testo attraverso uno script MatLab.

#### 4.2.1 Pozzetti e collettori

Riguardo i pozzetti le grandezze elencate negli shapefile da importare in SWMM sono le seguenti:

- coordinate planimetriche;
- identificativo;
- quote (quota del fondo scorrevole ed eventuale quota di salto).

Per quanto riguarda i collettori, invece, è necessario importare:

- coordinate planimetriche;
- identificativo;
- lunghezza;
- dimensioni (in sezione).

La rete è stata ricostruita per tratti lineari da un pozzetto di inizio ed uno di fine. Prima di tutto, vengono raccolte le quote di fondo e le coordinate planimetriche di tutti i pozzetti presenti nel tratto. La stessa operazione viene ripetuta con le quote e le dimensioni (sia in sezione che in lunghezza) dei collettori che collegano i suddetti pozzetti. Spesso capita che solo i pozzetti che costituiscono un nodo tra più rami hanno quota di fondo di nota: in casi come questi, le quote dei pozzetti intermedi vengono calcolate interpolando linearmente le quote dei pozzetti note alle estremità. Per comprendere meglio il procedimento seguito, è utile analizzare un esempio: prendendo il tratto di rete in Via Giovanni Cravero, rappresentato in figura 4.3 sono note le quote di fondo dei pozzetti da valle. Al contrario, le quote dei pozzetti tra i suddetti due non sono disponibili. Si ipotizza che la pendenza di tutto il tratto sia costante: partendo dalle quote note a monte e a valle e conoscendo la lunghezza delle condotte, si possono calcolare le quote einognite come:

 $quota_{incognita} = quota_{monte} - \frac{quota_{monte} - quota_{valle}}{lunghezza_{tratto}} \cdot lunghezza_{condotta}$ 



Figura 4.3 - Tratto di rete in Via G. Cravero, con pozzetti evidenziati in rosso

Altri casi critici si manifestano spesso all'inizio di alcuni tratti: in questi casi nel punto più a monte non c'è alcun pozzetto. Nel modello è necessario creare un pozzetto fittizio dal quale far partire il collettore. Ne si trova un esempio in Via Giovanni Poggio, in figura 4.4:



Figura 4.4 - Tratto di rete in Via G. Poggio, con pozzetti evidenziati in rosso

È necessario quindi inserire un pozzetto a monte del 4255616, all'inizio del tratto di rete. La quota di tale pozzetto si trova prolungando la pendenza del collettore immediatamente a valle (quello che unisce i pozzetti 4255616 e 4255612). La quota del pozzetto fittizio si trova quindi nel seguente modo:

# $quota_{fittizia} = quota_{4255616} + pendenza_{condotta} \cdot lunghezza_{condotta}$

L'ultimo passo per completare la modellazione di un tratto lineare consiste nel controllare la presenza di eventuali salti, ovvero pozzetti in cui i collettori in ingresso e in uscita si trovano a quote altimetriche diverse. L'utilizzo di salti di quota nelle infrastrutture fognarie è molto frequente in territori vallonati, poiché consente di contenere la pendenza dei rami di rete anche al di sotto della pendenza della superficie. Sebbene il bacino sia prevalentemente pianeggiante, presenta al suo interno diversi salti, riportati in figura 4.5:



Figura 4.5 – Posizione dei pozzetti di salto presenti nella rete evidenziate in rosso

I salti sono riportati tra i dati di partenza relativi ai pozzetti. Il codice di SWMM, tuttavia, richiede la costruzione di pozzetti di salto settando la quota di inizio o fine dei collettori. Per questa ragione, l'unico modo di modellare correttamente i salti è ricostruirli manualmente, facendo coincidere la quota di fondo del pozzetto con la quota più bassa del nodo e correggendo la quota di innesto dei collettori. Ad esempio, il pozzetto 4372026 presente su Corso Giulio Cesare (evidenziato nella figura 4.6) presenta un salto di quota:



Figura 4.6 - Tratto di rete in C.so G. Cesare, con il pozzetto di salto evidenziato in rosso

# Importando in SWMM i dati iniziali senza intervenire manualmente si otterrebbe il profilo riportato nella figura 4.7:



Figura 4.7 – Profilo del tratto in C.so G. Cesare importato dai dati di partenza

È evidente che il salto nel pozzetto 4372026 non è stato conservato, a causa della diversa convenzione tra dati e software di intendere il salto. Rispetto al pozzetto, il codice di SWMM innesta la fine della condotta a monte e l'inizio di quella a valle in corrispondenza della quota di fondo. Di conseguenza, occorre sollevare la sezione finale della condotta a monte di una quantità pari alla quota di salto, in questo caso di 3 metri. Tale valore viene inserito modificando il parametro "outlet offset" nelle proprietà della condotta. La sezione corretta è riportata nella figura 4.8:





Lo script MatLab ha permesso anche di inserire nel modello le sezioni ovoidali, non presenti direttamente in SWMM. Tali sezioni sono state elencate in un file testo leggibile da SWMM e associate ai tratti corrispondenti con l'ausilio dello script.

La scabrezza di tutte le condotte è stata valutata assegnando un numero di Manning pari a 0.013  $m^{-\frac{1}{3}} \cdot s$  (ovvero coefficiente di Manning-Strickler di circa 75  $m^{\frac{1}{3}} \cdot s^{-1}$ ), valore verosimile per il calcestruzzo.

Riguardo le sezioni dei collettori, in alcuni punti non sono note. In diverse occasioni le dimensioni incognite si trovano tra tratti con uguale sezione. Queste situazioni sono state risolte conservando la stessa sezione. In altri casi, i dati relativi a lunghi tratti consecutivi sono privi di sezione. Per tali zone è stato indispensabile segnalare la carenza a SMAT, come descritto nel paragrafo 4.4.

#### 4.2.2 Modellazione della sezione del collettore strumentato

Particolare attenzione è stata posta nella modellazione del collettore che presenta al suo interno un misuratore di livello e velocità da cui è possibile ricavare il valore di portata. Nei dati di partenza questo collettore è stato campionato con una sezione circolare di diametro pari a 1500 mm, ma da una relazione idraulica condotta da SMAT nel novembre del 2021 emerge che la sezione reale è di forma ovoidale 1500x1600. È molto importante ricreare la sezione esatta nel modello per fare in modo che eventuali divergenze tra la portata simulata e misurata non dipendano dalla geometria della condotta strumentata. La sezione è stata quindi ricalcata su un file DXF, successivamente convertito in un file di testo leggibile da SWMM per importare nel software tale sezione. Per verificare la verosimiglianza tra la portata effettivamente misurata e quella passante per la sezione digitale, è stato preso come riferimento l'evento verificatosi il 25/07/2021. Prendendo il livello misurato in un certo istante, è stata calcolata la relativa area trasversale occupata dall'acqua nella sezione modellata. A questo punto, è possibile calcolare la portata moltiplicando tale area per la velocità misurata:

$$Q = v \cdot A$$

Per far combaciare la portata stimata con quella realmente misurata, sono state apportate modifiche alla geometria della sezione, in modo da modificarne l'area. La verifica è stata condotta per 3 istanti di riferimento, con 3 diversi livelli registrati, ottenendo i risultati riportati nella tabella 4.3:

Data e ora	Livello misurato	Velocità	Portata	Portata stimata
	[mm]	misurata [m/s]	misurata	[l/s]
			[l/s]	
25/07/21 22:00	558	1.6	1122.9	1122.9
25/07/21 22:09	352	1.4	562.8	562.8
25/07/21 22:15	267	1.2	313.8	313.8

Tabella 4.3 – Confronto tra la portata stimata nel modello e la portata registrata dal misuratore di livello e velocità nei tre istanti di riferimento

La geometria così ottenuta è stata assegnata non solo al collettore strumentato, ma anche a tutto il tratto limitrofo contrassegnato inizialmente da sezione circolare di diametro 1500 mm.

# 4.2.3 Sottobacini

Ultimata la modellazione della rete, si è proceduto alla suddivisione della superficie in sottobacini, in modo da poter modellare capillarmente la percentuale di permeabilità ed avere la possibilità di configurare spazialmente gli eventi precipitativi. Il primo passo consiste nel tracciare i sottobacini, per poi calcolarne le caratteristiche fisiche. Preliminarmente, il tracciamento è stato completato seguendo i topoieti dei pozzetti, ovvero i confini dell'insieme dei punti più vicini ad ogni pozzetto, come rappresentato dalla figura 4.9:



Figura 4.9 – Topoieti dei pozzetti nella rete oggetto di studio

Raggruppando al massimo 5 pozzetti si definiscono i sottobacini. Le aree così ottenute sono state poi private delle aree verdi più grandi, nelle quali verosimilmente l'acqua si infiltra e non entra mai nella rete di drenaggio. Ad esempio, come si può notare dalla figura 4.10, è stata esclusa la zona del
parco dell'Arrivone a Nord-Est del bacino, in quanto considerando la vicinanza alla Stura l'acqua viene filtrata dal terreno e scaricata senza mai entrare in rete. Stessa filosofia è stata adottata per le aree verdi ad Est, limitrofe alla sponda del Po.



Figura 4.10 – Discretizzazione in sottobacini

Definita la disposizione dei sottobacini, la si deve importare in SWMM attraverso parametri geometrici e fisici, ovvero area, pendenza, coordinate dei vertici dei poligoni, percentuale di permeabilità e larghezza equivalente. Mentre l'area e le coordinate dei vertici sono immediatamente calcolabili attraverso un software GIS, la definizione degli altri parametri richiede ulteriori passaggi.

La pendenza media di ogni sottobacino è stata stimata con l'ausilio di un DTM (modello digitale del terreno) scaricato dal geoportale della regione Piemonte. Il documento adottato riproduce l'area metropolitana di Torino con un reticolo di passo 5 metri, ed importandolo in GIS è possibile calcolare la pendenza percentuale media attraverso la funzione "pendenza percentuale".

La superficie di permeabilità viene calcolata considerando i tipi di superfici compresi in ogni sottobacino. In particolare, si distinguono 13 possibili superfici diverse, contraddistinte da specifici coefficienti di Manning e percentuali di impermeabilità, come riassunti nella tabella 4.4:

n°	tipo superficie	Manning $[m^{-\frac{1}{3}} \cdot s]$	percentuale di impermeabilità [%]
1	piste ciclabili	0.011	90
2	ferrovie	0.011	90
3	corsi d'acqua	-	-
4	edifici principali	0.013	90
5	edifici secondari	0.013	90
6	manufatti	0.013	90
7	campi sportivi	0.015	30
8	orografia del terreno	0.05	30
9	aree libere	0.05	40
10	aree agro-forestali	0.4	20
11	verde urbano	0.24	10
12	marciapiedi	0.0013	90
13	strade	0.011	90

Tabella 4.4 – Coefficiente di Manning e percentuale di permeabilità delle varie superfici

In ogni sottobacino, è stata quindi calcolata la percentuale di permeabilità come media ponderata sull'area delle percentuali di permeabilità delle varie superfici incluse nel sottobacino. Per capire quali superfici ci sono nei vari sottobacini, è stata usata la Carta Tecnica a Colori del comune di Torino, dove ad ognuna delle 13 superfici è assegnato un determinato colore. Rapportando l'area di ogni superficie all'area complessiva del sottobacino, è possibile quindi "pesarne" il coefficiente di permeabilità. Tale procedimento è stato automatizzato attraverso uno script MatLab, dopo aver vettorializzato la carta e associato ad ogni colore la relativa superficie. Alle zone della carta vuote, non ricadenti in nessuno dei 13 tipi di superficie considerati, è stato assegnato un coefficiente di permeabilità del 50%, immaginando che metà della loro area sia completamente permeabile e metà completamente impermeabile. Comunque, l'impatto di queste regioni nel computo generale è molto basso, in quanto costituisce meno del 5% dell'area totale.

L'ultimo parametro richiesto da SWMM è la larghezza equivalente, intesa come il rapporto tra l'area del sottobacino e la lunghezza di ruscellamento, ovvero il massimo tragitto che una generica goccia di pioggia percorre prima di entrare in rete. Per semplicità, questo percorso è stato immaginato rettilineo ed è stato tracciato manualmente per ogni sottobacino.

#### 4.3 Verifiche richieste a SMAT

Come accennato nel paragrafo 4.2, in alcuni punti non sono note le sezioni dei collettori. Non è raro che i dati relativi a lunghi tratti consecutivi sono privi di sezione. In queste situazioni sono state preliminarmente ipotizzate condotte ovoidali 700x1200 o 600x900, a seconda dell'importanza del tratto all'interno della rete globale. L'ipotesi è giustificata dalla presenza ricorrente di queste due sezioni all'interno della fognatura bianca del comune di Torino. Quindi è stato richiesto a SMAT di verificare le ipotesi espresse attraverso misurazione sul campo in modo da poter aggiornare il modello.

Ad esempio, nel tratto di quasi 300 metri nei pressi del raccordo autostradale Torino-Casello fotografato nella figura 4.11 risulta difficile anche prevedere la possibile sezione, a causa della distanza dagli altri rami e l'assenza di tratti simili:



Figura 4.11 – Tratto di rete nei pressi del raccordo autostradale Torino-Caselle con sezioni incognite evidenziato in rosso

Grazie alle verifiche di SMAT è stato possibile comprendere che la sezione dei collettori in esame era in cemento armato e di forma ovoidale con assi di 700 mm e 1200 mm.

Altre situazioni si sono rivelate ancora più complesse, in quanto dai dati disponibili era difficile capire i reali collegamenti tra i pozzetti. Ad esempio, in via Arcangelo Corelli sono presenti tre condotte che scendono verso Via Sandro Botticelli, ma dai dati di partenza solo una sfocia nel collettore perpendicolare, come visibile nella figura 4.12:



Figura 4.12 – Raccordo tra Via A. Corelli e Via S. Botticelli come riportato nei dati iniziali

Le verifiche hanno evidenziato come sia la condotta centrale a sfociare nel tratto di Via Sandro Botticelli, mentre il collettore a destra termina in un canale a cielo aperto oltre la strada e quello a sinistra prosegue fino allo sfocio nella Stura, come testimoniato dalla figura 4.13:



Figura 4.13 – Situazione verificata da SMAT del raccordo tra Via A. Corelli e Via S. Botticelli come riportato nei dati iniziali

Una situazione simile si ripete anche nell'incrocio tra Corso Giulio Cesare e Via Sandro Botticelli, fotografato nella figura 4.14, dove dalle informazioni iniziali un collettore non risulta sfociare nel tratto di Via Sandro Botticelli; SMAT ha verificato la presenza effettiva del collegamento attraverso un pozzetto di salto ed è stato conseguentemente aggiornato il modello.



Figura 4.14 – Verifica condotta da SMAT sul raccordo tra C.so Giulio Cesare e Via S. Botticelli

Questa fase è stata indispensabile per validare la geometria della rete ed inoltre è stata fondamentale anche per SMAT per prendere conoscenza dei punti critici della propria cartografia e aggiornarli.

### 5. Modellazione della precipitazione

Come descritto nel capito 3, all'interno del bacino oggetto di studio sono installati due pluviometri appartenenti alla rete di SMAT costituita in totale da 20 stazioni di misura. La discretizzazione dell'area in sottobacini rende possibile definire localmente la precipitazione, assegnando uno specifico ietogramma ad ogni sottobacino.

Non è detto però che i dati disponibili siano stati registrati durante eventi rari e molto intensi. Quindi, per iniziare a capire i punti più critici della rete, è utile simularne la risposta ad eventi di progetto ideali, associati ad un certo tempo di ritorno. Il tempo di ritorno scelto è pari a 5 anni, sufficiente a definire eventi abbastanza intensi ma non eccessivamente alto, così da dar modo di individuare i punti della rete nei quali si riscontrano grossi problemi anche per precipitazioni non troppo rare; di conseguenza, questi punti saranno sicuramente i più sensibili.

Le simulazioni svolte con tali precipitazioni di progetto sono descritte dettagliatamente nel Capitolo 6.

#### 5.1 Modellazione della precipitazione di progetto

Inizialmente, verrà quindi simulato il comportamento della rete ad eventi di pioggia ideali: Oltre a permette l'individuazione dei punti più critici, saranno anche evidenziati eventuali errori geometrici di modellazione. Si decide di modellare due eventi con intensità costate e diversa durata associati ad un tempo di ritorno di 5 anni. Il primo di durata pari a un'ora ed il secondo di durata pari a 10 minuti. Non sono stati usati eventi con tempo di ritorno alti, in quanto tutti i punti che danno grossi problemi per precipitazioni molto frequenti sono sicuramente i più sensibili.

L'intensità è stata valutata con il criterio statistico di Gumbel. I risultati di questa attività sono raccolti nell'atlante delle piogge intense stilato da ARPA Piemonte (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale). Questo servizio permette di ricavare, per assegnato tempo di ritorno, le linee segnalatrici di probabilità pluviometrica stimate con vari criteri statistici in qualsiasi punto del territorio regionale. In particolare, l'area metropolitana di Torino è stata suddivisa in una griglia con maglie di 250 metri di lato: in ogni maglia sono riportate le altezze di pioggia stimate con i vari criteri e tempi di ritorno. Ad esempio, nel territorio comunale di Torino per tempo di ritorno di 5 anni e durata oraria l'atlante restituisce i dati rappresentati nella figura 5.1:



Figura 5.1 – Altezze di pioggia stimate da Arpa Piemonte nell'atlante delle piogge intense sul territorio comunale di Torino associate ad un tempo di ritorno di 5 anni e durata oraria

Si può notare come vengano stimate altezze maggiori in prossimità del centro della città. Il bacino oggetto di studio è affetto da piogge moderate, con valori di altezze a cavallo tra quelle più alte del centro e quelle in zone meno impattate.

### 5.1.1 Evento di pioggia con ietogramma ideale di durata oraria

Come detto, la prima simulazione si riferisce ad un evento con ietogramma costante di durata pari a un'ora, associato ad un tempo di ritorno di 5 anni. Nel bacino oggetto di studio, dai dati raccolti nell'atlante delle piogge intense si ricava che la massima altezza di pioggia stimata in una maglia del reticolo è pari a 39.57 mm, mentre la minima equivale a 38.7 mm. Le altezze di pioggia assegnate alle varie maglie del reticolo sono rappresentate nella figura 5.2:



Figura 5.2 – Altezze di pioggia cumulate sul bacino oggetto di studio stimate nel reticolo dell'atlante delle piogge intense per eventi di durata oraria associati ad un tempo di ritorno di 5 anni

Per costruire lo ietogramma di progetto sono state mediate le altezze di pioggia stimate mediante la distribuzione di Gumbel relative alle maglie comprese nel bacino oggetto di studio. Per durata di un'ora l'altezza di pioggia mediata è pari a 38.13 mm. Di conseguenza, l'intensità media è di 38.1 mm/h. Con questo valore si costruisce lo ietogramma costante per durata di un'ora, riportato nella figura 5.3:



Figura 5.3 – letogramma costante con intensità stimata dall'atlante delle piogge intense per un evento di durata oraria associato ad un tempo di ritorno di 5 anni

## 5.1.2 Evento di pioggia con ietogramma ideale di 10 minuti di durata

Anche in questo caso è stato costruito uno ietogramma costante con intensità calcolata sempre dall'atlante delle piogge associata ad un tempo di ritorno di 5 anni e durata di 10 minuti. Le altezze di pioggia assegnate alle varie maglie del reticolo sono rappresentate nella figura 5.4:



Figura 5.4 – Altezze di pioggia cumulate sul bacino oggetto di studio stimate nel reticolo dell'atlante delle piogge intense per eventi di 10 minuti di durata associati ad un tempo di ritorno di 5 anni

Nel bacino oggetto di studio, si nota che la massima altezza stimata in una maglia del reticolo è pari a 15.6 mm, mentre la minima equivale a 23.9 mm. Anche in questo caso i valori più alti si stimano a Sud-Est, nei pressi della sponda del Po. Per durata di 10 minuti, mediando i valori nel bacino si ottiene un'altezza di pioggia pari a 23.71 mm, a cui corrisponde un'intensità di 142.3 mm/h. Lo ietogramma costante di progetto è riportato nella figura 5.5:



Figura 5.5 – letogramma costante con intensità stimata dall'atlante delle piogge intense per un evento di durata oraria associato ad un tempo di ritorno di 5 anni

#### 5.2 Modellazione delle precipitazioni reali

Dopo aver corretto il modello ed individuato i punti più critici simulando la risposta della rete agli eventi di progetto descritti nel paragrafo 5.1, si può passare all'analisi del comportamento del sistema di drenaggio ad eventi registrati. Come si vedrà nel Capitolo 8, questa fase è utile per calibrare i parametri idraulici del modello, a partire dal confronto tra i risultati simulati e quelli misurati.

Visto che nell'area oggetto di studio sono presenti due pluviometri, è necessario fissare dei metodi che considerino i dati registrati da entrambi gli strumenti di misura. In questo modo sarà possibile definire una specifica precipitazione su ogni sottobacino, in modo da riprodurre la variabilità spaziale degli eventi di pioggia nel modo più realistico possibile. A tal proposito, verranno studiate varie ricostruzioni degli eventi registrati. Grazie alla possibilità di confrontare i dati registrati dal misuratore di livello e velocità visto nel Capitolo 3 con i risultati delle simulazioni, sarà possibile identificare la più realistica modellazione degli eventi di pioggia.

Inizialmente, si sceglie di sottoporre tutti i sottobacini ad uno stesso evento: in particolare, a tutta l'area di studio si assegnano gli eventi registrati dal pluviometro PLUTO10, considerando la sua vicinanza al misuratore di livello e velocità. Successivamente, i dati registrati dai due pluviometri saranno interpolati linearmente per ogni istante di misurazione. In modo da poter "pesare" la distanza di ogni sottobacino dai punti di misura. Questi metodi verranno descritti più approfonditamente nel Capitolo 7, mentre nel Capitolo 8 verrà studiato un ulteriore metodo che prevederà l'assegnazione dello ietogramma registrato da un pluviometro a tutti i sottobacini presenti all'interno della sua area di influenza.

Nei capitoli 6 e 7 saranno descritte le simulazioni condotte con le suddette precipitazioni. In corrispondenza del misuratore di portata si analizzeranno i valori di portata, da cui è possibile ricavare il volume, il livello e la velocità nel collettore, confrontandoli con quelli misurati.

#### 5.2.1 Unico ietogramma su tutto il bacino

La prima idea consiste nell'assegnare lo ietogramma misurato dal pluviometro *PLUTO10* a tutti i sottobacini. Si sceglie di usare questo pluviometro vista la sua vicinanza al misuratore di livello e velocità, in quanto è collocato circa 900 metri più a monte. Gli ietogrammi misurati sono riportati nelle figure 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9:



Figura 5.6 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 25 luglio 2021



Figura 5.7 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 26 luglio 2021



Figura 5.8 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 27 luglio 2021



Figura 5.9 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 6 settembre 2021

Si può notare che l'evento del 25 luglio è il più impattante per la rete, sia in termini di volume meteorico che per durata. Infatti, intorno alle ore 19:45 si tocca un'intensità massima di 46.4 mm/h e l'evento è durato in totale oltre 4 ore. Gli altri eventi sono più brevi, con durata di circa un'ora, ed in nessuno dei 3 l'intensità ha mai superato i 15 mm/h.

### 5.2.2 Interpolazione lineare delle intensità misurate

La seconda modellazione testata considera la variabilità spaziale delle precipitazioni. Prevede di assegnare diversi ietogrammi in ogni sottobacino, calcolandoli attraverso un'interpolazione lineare tra i dati registrati dai due pluviometri installati nell'area di interesse. A differenza del metodo descritto nel paragrafo 5.2.1, in questo caso si considerano anche le intensità misurate dal secondo pluviometro disponibile nel bacino (PLUTO20); si costruisce uno ietogramma per ogni sottobacino, in cui il valore di intensità istante per istante è calcolato mediando le intensità registrate dai 2 pluviometri, dando più peso alla misura più vicina.

## 6. Prime simulazioni

Completata la costruzione del modello e definiti i relativi parametri idraulici, si simula il comportamento della rete sottoposta ai due eventi di pioggia di progetto definiti nel paragrafo 5.1. Le prime simulazioni sono finalizzate a trovare eventuali errori di geometria ed iniziare a capire quali sono i punti più critici del sistema. I due eventi analizzati, grazie alla loro elevata intensità, facilitano questa analisi.

Il primo obiettivo consiste quindi nell'individuazione di eventuali errori nel modello: se 12 ore dopo la fine dell'evento alcuni collettori risultano ancora pieni di acqua è probabile che le pendenze non rispecchino lo stato di fatto. Questo problema è stato riscontrato in alcuni punti, a causa della presenza di impluvi. Ciò può dipendere dall'errato campionamento della quota di fondo dei pozzetti oppure da un improprio inserimento dei dati. Tali situazioni sono state corrette andando ad interpolare linearmente le quote dei pozzetti siti tra due pozzetti di quota affidabile.

Inoltre, è importante sottolineare che in questa fase il modello non è ancora calibrato. Ciò vuol dire che sono stati adottati parametri di infiltrazione relativi a suoli di riferimento elencati nel paragrafo 4.1.4 e riportati nuovamente nelle tabelle 6.1 e 6.2:

Tipo di Suolo	f <sub>0</sub> [mm/h]	f <sub>c</sub> [mm/h]	k [1/h]
Suolo A	250	25.4	2
Suolo C	125	6.3	2

Tabella 6.2 – Valori di depression storage adottati

Tipo di suolo	Depression storage [mm]
permeabile	5
impermeabile	2

Ai sottobacini meno permeabili sono stati assegnati i parametri del suolo C, mentre alle aree con coefficiente di permeabilità superiore al 50%, sono stati associati i parametri del suolo A, per simulare una maggiore infiltrazione.

#### 6.1 Evento di durata oraria associato ad un tempo di riorno di 5 anni

Il primo evento di pioggia studiato è quello di durata oraria e viene assegnato a tutti i sottobacini. Il suo ietogramma è stato costruito nel paragrafo 5.1.1 ed è riportato nella figura 6.1:



Figura 6.1 – letogramma costante con intensità stimata dall'atlante delle piogge intense per un evento di durata oraria associato ad un tempo di ritorno di 5 anni

Definita la precipitazione, si simula la risposta della rete con i parametri idraulici di riferimento definiti nel Capitolo 4. Il primo risultato studiato è il grado di riempimento dei collettori. Questa analisi permette di capire quali aree sono maggiormente sollecitate e valutare l'entità di eventuali esondazioni. Le zone più critiche vengono in seguito analizzate più approfonditamente attraverso lo studio dei profili dei tratti.

### 6.1.1 Grado di riempimento dei collettori

Il primo fattore analizzato è dunque il grado di riempimento dei collettori. La situazione più critica si raggiunge dopo circa un'ora e 15 minuti dall'inizio dell'evento ed è fotografata dalla figura 6.2:



Figura 6.2 – Grado di riempimento dei collettori simulato un'ora e 17 minuti dopo l'inizio di un evento di durata oraria associato ad un tempo di ritorno di 5 anni

La precipitazione di un'ora di durata non induce gravi criticità nel sistema di drenaggio. In rari casi si supera il 50% della capacità di riempimento e non risultano esserci esondazioni in nessun pozzetto. Attraverso l'analisi del grado di riempimento, si può notare che la zona più sollecitata della rete si trova a Nord, in un'area urbanizzata poco prima degli sfoci più a monte nella Stura. Proprio in questa zona il collettore nei pressi di Via Vittoria Colonna va in pressione. Ciò avviene anche in un collettore di Via Sandro Botticelli. Entrambe queste condotte hanno sezione circolare, rispettivamente di 800 mm e 400 mm di diametro.

# 6.1.2 Analisi dei punti con alto grado di riempimento

## 6.1.2.1 Via Vittoria Colonna

Per capire meglio la situazione, è utile analizzare i profili dei tratti. Il collettore in Via Vittoria Colonna riceve acqua da Corso Vercelli e la trasporta verso Est:



Figura 6.3 – Planimetria del tratto in Via V. Colonna. Evidenziato in rosso il collettore in pressione, in arancione il tratto di cui si analizza il profilo in figura 6.4



Figura 6.4 – Profilo del tratto in Via V. Colonna dopo un'ora e 15 minuti dall'inizio dell'evento

Analizzando il profilo, risulta esserci un pozzetto di salto che collega il collettore di Corso Vercelli a quello parallelo a Via Vincenzo Troya. Quest'ultimo collettore ha una pendenza dello 0.09%, più bassa rispetto alle condotte più a valle. Per questa ragione dopo il salto il volume di acqua incontra maggiore resistenza allo scorrimento.

# 6.1.2.2 Via Sandro Botticelli

Nel secondo caso, la condotta ad andare in pressione è un breve tratto che si immette nel ramo principale in Via Sandro Botticelli:



Figura 6.5 – Planimetria del tratto in Via S. Botticelli. Evidenziato in rosso il collettore in pressione, in arancione il tratto di cui si analizza il profilo in figura 6.6



Figura 6.6 – Profilo del tratto in Via S. Botticelli dopo un'ora e 15 minuti dall'inizio dell'evento

Si nota che il punto dove il grado di riempimento è massimo si trova in corrispondenza del pozzetto più a monte. Questa situazione, sebbene non grave, potrebbe essere migliorata inserendo un ulteriore pozzetto più a valle ed è verosimilmente provocata dalle ridotte dimensioni in sezione del collettore.

#### 6.2 Evento di durata di 10 minuti associato ad un tempo di riorno di 5 anni

Conclusa la simulazione dell'evento di durata oraria, si analizza la risposta della rete sottoposta alla precipitazione di durata di 10 minuti costruita nel paragrafo 5.1.2. Lo ietogramma di progetto è nuovamente riportato nella figura 6.7:



Figura 6.7 – Ietogramma costante con intensità stimata dall'atlante delle piogge intense per un evento di durata oraria associato ad un tempo di ritorno di 5 anni

Anche in questo caso si analizza prima di tutto il grado di riempimento dei collettori e successivamente si approfondiscono gli studi sulle zone maggiormente sollecitate.

#### 6.2.1 Grado di riempimento dei collettori

Analizzando il grado di riempimento dei collettori, salta subito all'occhio che l'evento di 10 minuti di durata impatta maggiormente la rete di quanto non faccia l'evento di durata oraria, a causa della maggior intensità. La situazione più critica si presenta 15 minuti dopo l'inizio dell'evento, ed è fotografata dall'immagine 6.8:



Figura 6.8 – Grado di riempimento dei collettori simulato 15 minuti dopo l'inizio di un evento di 10 minuti di durata associato ad un tempo di ritorno di 5 anni

La maggior parte delle condotte va in pressione e la zona meno sollecitata risulta essere quella a Sud-Est, grazie alla vasta presenza di aree verdi in cui l'acqua può infiltrarsi e defluire nel Po senza che entri in rete. Ad andare in crisi, alla zona residenziale a Nord, che ha evidenziato difetti già nell'evento di durata oraria, si aggiunge la zona centrale del bacino, la zona a Ovest di Corso Vercelli ed il tratto in Via Bologna, fino allo sfocio nella Stura.

# 6.2.2 Esondazioni

Nel caso di evento associato ad un tempo di ritorno di 5 anni e durata di 10 minuti, a causa dell'elevato numero di collettori in pressione, vengono previste esondazioni in diversi pozzetti, come mostrato nella figura 6.9:



Figura 6.9 – zone del bacino più sollecitate da un evento di 10 minuti di durata associato ad un tempo di ritorno di 5 anni

Tra le varie zone che subiscono esondazione, se ne possono distinguere 4 più impattate. La prima si trova a Nord di Corso Giulio Cesare, poco prima dello sfocio nella Stura, la seconda su Via Sandro Botticelli, la terza vicino all'ospedale San Giovanni Bosco, dove si trova il pozzetto che emette più volume, e la quarta in Via Bologna. Il volume complessivamente emesso in ognuna di tali aree è riportato in tabella 6.3:

Zona	Volume emesso [m <sup>3</sup> ]
1	4888
2	2248
3	2008
4	1132

#### Tabella 6.3 - Volume emesso dai pozzetti nelle 4 zone più sollecitate

# 6.2.3 Analisi dei punti critici

# 6.2.3.1 Zona 1 – Corso Giulio Cesare

La prima zona analizzata è dove le simulazioni prevedono il maggior volume emesso, pari a 4888 m<sup>3</sup>. I pozzetti che esondano sono indicati in figura 5.14:



Figura 6.10 - Planimetria del tratto in Via R. Scotellaro. Evidenziato in arancione il tratto di cui si analizza il profilo in figura 6.11, mentre i pozzetti colorati di rosso esondano

Si nota che la maggior parte dei pozzetti che esondato sono allineati nel tratto in Via Rocco Scotellaro, quindi è utile analizzarne il profilo:



Figura 6.11 – Profilo del tratto in Via R. Scotellaro 15 minuti dopo l'inizio dell'evento; evidenziati in rosso i pozzetti che esondano

I collettori di questo ramo hanno sezione ovoidale 700x1200 mm. Si può notare come la loro pendenza sia più accentuata a monte, e diminuisca procedendo verso valle. I pozzetti che emettono volume si trovano nel centro del tratto, a causa della loro ridotta profondità.

# 6.2.3.2 Zona 2 – Via Sandro Botticelli

Su Via Sandro Botticelli sono allineati vari pozzetti che emettono un volume complessivo pari a 2248 m<sup>3</sup>.



Figura 6.12 - Planimetria del tratto in Via S. Botticelli. Evidenziato in arancione il tratto di cui si analizza il profilo in figura 6.13, mentre i pozzetti colorati di rosso esondano

In questo caso, i pozzetti che esondano si trovano nella zona centrale di Via Sandro Botticelli, quindi è utile analizzare il profilo di tutta la Via:



Figura 6.13 – Profilo del tratto in Via S. Botticelli 15 minuti dopo l'inizio dell'evento; evidenziati in rosso i pozzetti che esondano

Tutto il ramo è costituito da collettori ovoidali 800x1500 mm. I pozzetti che esondano si trovano in una zona con pendenza dello 0.15%, più bassa sia rispetto a monte che a valle. Dopo il salto al centro del tratto la pendenza incrementa e sebbene alcuni collettori vadano in pressione non risultano esserci esondazioni.

# 6.2.3.3 Zona 3 – Via Giambattista Pergolesi



In questa zona si trova il pozzetto più critico, ed il volume complessivo emesso è di 2008 m<sup>3</sup>.

Figura 6.14 - Planimetria del tratto in Via G. Pergolesi. Evidenziato in arancione il tratto di cui si analizza il profilo in figura 6.15, mentre i pozzetti colorati di rosso esondano

I collettori hanno sezione ovoidale 700x1200 mm e pendenza costante intorno allo 0.4%.



Figura 6.15 – Profilo del tratto in Via G. Pergolesi 15 minuti dopo l'inizio dell'evento; evidenziati in rosso i pozzetti che esondano

Le esondazioni riguardano i pozzetti più a monte, a causa della loro ridotta profondità.

## 6.2.3.4 Zona 4 – Via Bologna



Nell'ultima zona analizzata viene emesso un volume complessivo di1132 m<sup>3</sup>.

Figura 6.16 - Planimetria del tratto in Via Bologna. Evidenziato in arancione il tratto di cui si analizza il profilo in figura 6.17, mentre i pozzetti colorati di rosso esondano

L'esondazione è provocata in gran parte dai pozzetti allineati in Via Bologna, dunque è utile analizzarne il profilo.



Figura 6.17 – Profilo del tratto in Via Bologna 15 minuti dopo l'inizio dell'evento; evidenziati in rosso i pozzetti che esondano

Come molti altri rami della rete, anche questo tratto è costituito da collettori ovoidali 700x1200 mm. I pozzetti che esondando si trovano nella zona centrale: qui la pendenza è pari allo 0.3% e diminuisce rispetto a monte, dove si attestava intorno allo 0.9%. Procedendo verso valle, la pendenza diminuisce ulteriormente, fino allo 0.1%, ma non si prevedono più esondazioni.

#### 6.3 Osservazioni

Con queste prime simulazioni si è visto che l'evento di durata di 10 minuti provoca effetti più impattanti rispetto all'evento di durata oraria. In quest'ultimo alcuni collettori vanno in pressione, ma non si prevedono esondazioni all'interno della rete. Nell'evento di durata di 10 minuti, invece, svariati pozzetti emettono portata, a causa delle dimensioni dei collettori e del profilo dei tratti nei quali si trovano.

Queste simulazioni hanno permesso di individuare le aree più critiche del bacino, ma è importante sottolineare che gli eventi di pioggia considerati sono puramente ideali. Infatti, è stata imposta che un'intensità associata ad un tempo di ritorno di 5 anni e ad una durata di un'ora e 10 minuti ricada sulla totalità del bacino. Eventi del genere sono molto irrealistici, poiché è importante ricordare che l'entità delle altezze di pioggia vengono stimate puntualmente e non su aree così grandi. Tuttavia, è stato comunque fondamentale sottoporre la rete a precipitazioni così intense, in modo da poterne valutare la risposta. A valle di queste considerazioni, il comportamento della rete si può ritenere piuttosto soddisfacente.

### 7. Simulazione con eventi di pioggia reali

Effettuate le simulazioni con ietogrammi ideali per correggere gli errori nel modello ed individuare i punti più critici della rete, si passa ad analizzare il comportamento del bacino sottoposto ad eventi realmente registrati. Come visto nel Capitolo 3, all'interno dell'area oggetto di studio sono presenti due pluviometri, uno collocato nei pressi di corso Giulio Cesare (denominato *PLUTO10*), e l'altro nei pressi di via Emilio Salgari (denominato *PLUTO20*). Si ha disponibilità di dati raccolti nell'estate del 2021. In particolare, sono stati registrati 4 eventi di pioggia, in data 25 luglio, 26 luglio, 27 luglio e 9 settembre.

Per verificare l'affidabilità del modello, per ogni evento si confronta la risposta simulata con i dati misurati dal collettore strumentato situato poco a monte dello sfocio nella Stura in corso Giulio Cesare.

#### 7.1 Unico ietogramma su tutto il bacino

Come descritto nel paragrafo 5.2, vista la presenza di due pluviometri sul bacino, è necessario decidere come modellare l'evento di pioggia. La prima idea consiste nell'assegnare lo ietogramma misurato dal pluviometro *PLUTO10* a tutti i sottobacini. Nel paragrafo 5.2.1 è stato deciso di usare i dati registrati dal pluviometro PLUTO10 vista la sua vicinanza al misuratore di livello e velocità, in quanto è collocato circa 900 metri più a monte. Gli ietogrammi misurati sono i seguenti:



Figura 7.1 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 25 luglio 2021



Figura 7.2 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 26 luglio 2021



Figura 7.3 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 27 luglio 2021


Figura 7.4 – letogramma registrato dal pluviometro PLUTO10 il 6 settembre 2021

Definiti gli eventi di pioggia, si procede con le simulazioni della risposta della rete per ognuno di essi. In corrispondenza del misuratore di portata, si analizzano i valori di portata, da cui è possibile ricavare il volume, livello e velocità nel collettore, confrontandoli con quelli misurati.

### 7.1.1 Evento del 25/07/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 25 luglio, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità.



Figura 7.5 – Confronto tra la portata misurata e la portata simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 25 luglio 2021



Figura 7.6 – Confronto tra il livello misurato ed il livello simulato con parametri del modello di riferimento nell'evento del 25 luglio 2021



Figura 7.7 – Confronto tra la velocità misurata e la velocità simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 25 luglio 2021

Durante l'evento, risultano i valori massimi elencati nella tabella 7.1:

Tabella 7.1 – Valori massimi misurati e simulati nell'evento del 25 luglio 2021

	misura	simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	2.18	2.36
v <sub>max</sub> [m/s]	1.91	1.77
H <sub>max</sub> [mm]	973.6	960

Il volume complessivamente emesso è riportato nella tabella 7.2:

Tabella 7.2 – Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 25 luglio 2021

	misura	simulazione
V [m <sup>3</sup> ]	6184.8	10453.3

### 7.1.2 Evento del 26/07/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 26 luglio, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità.



Figura 7.8 – Confronto tra la portata misurata e la portata simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 26 luglio 2021



Figura 7.9 – Confronto tra il livello misurato ed il livello simulato con parametri del modello di riferimento nell'evento del 26 luglio 2021



Figura 7.10 – Confronto tra la velocità misuratae la velocità simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 26 luglio 2021

# I valori massimi sono riportati nella tabella 7.3:

	misura	simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	0.06	0.20
v <sub>max</sub> [m/s]	0.80	0.77
H <sub>max</sub> [mm]	112	260

Tabella 7.3 – Valori massimi misurati e simulati nell'evento del 26 luglio 2021

# Il volume complessivamente emesso è riportato nella tabella 7.4:

Tabella 7.4 – Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 26 luglio 2021

	misura	simulazione
V [m³]	74.3	577.5

## 7.1.3 Evento del 27/07/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 27 luglio, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità.



Figura 7.11 – Confronto tra la portata misurata e la portata simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 27 luglio 2021



Figura 7.12 – Confronto tra il livello misurato ed il livello simulato con parametri del modello di riferimento nell'evento del 27 luglio 2021



Figura 7.13 – Confronto tra la velocità misurata e la velocità simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 27 luglio 2021

# I valori massimi sono riportati nella tabella 7.5:

	misura	simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	0.07	0.08
v <sub>max</sub> [m/s]	0.82	0.56
H <sub>max</sub> [mm]	119	170

Tabella 7.5 – Valori massimi misurati e simulati nell'evento del 27 luglio 2021

# Il volume complessivamente emesso è riportato nella tabella 7.6:

Tabella 7.6 – Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 27 luglio 2021

	misura	simulazione
V [m³]	148.5	255.5

## 7.1.4 Evento del 06/09/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 6 settembre, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità



Figura 7.14 – Confronto tra la portata misurata e la portata simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 6 settembre 2021



Figura 7.15 – Confronto tra il livello misurato ed il livello simulato con parametri del modello di riferimento nell'evento del 6 settembre 2021



Figura 7.16 – Confronto tra la velocità misurata e la velocità simulata con parametri del modello di riferimento nell'evento del 6 settembre 2021

#### I valori massimi sono riportati nella tabella 7.7:

Tabella 7.7 – Valori massimi misurati e simulati nell'evento del 6 settembre 2021

	misura	simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	0.23	0.03
v <sub>max</sub> [m/s]	1.02	0.39
H <sub>max</sub> [mm]	246	100

#### Il volume complessivamente emesso è riportato nella tabella 7.8:

Tabella 7.8 – Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 6 settembre 2021

	misura	simulazione
V [m³]	225.7	117.0

#### 7.2 Interpolazione lineare delle intensità misurate

Visto che in tutti gli eventi considerati il volume emesso simulato è superiore a quello registrato, è ragionevole concludere che considerare le intensità misurate dal pluviometro PLUTO10 costanti su tutto il bacino sovrastimi l'entità degli eventi.

Si procede quindi con una nuova modellazione degli ietogrammi, calcolandoli attraverso un'interpolazione lineare. In particolare, si considerano anche le intensità misurate dal secondo pluviometro disponibile nel bacino (PLUTO20); si costruisce uno ietogramma per ogni sottobacino, in cui il valore di intensità istante per istante è calcolato mediando le intensità registrate dai 2 pluviometri, dando più peso alla misura più vicina.

### 7.2.1 Evento del 25/07/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 25 luglio, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità.



Figura 7.17 – Confronto tra la portata misurata il 25 luglio 2021 e la portata simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.18 – Confronto tra il livello misurato il 25 luglio 2021 ed il livello simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.19 – Confronto tra la velocità misurata il 25 luglio 2021 e la velocità simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento

I valori massimi misurati e simulati sono elencati nella tabella 7.9:

Tabella 7.9 – Valori massimi misurati e simulati nell'evento del 25 luglio 2021

	misura	Simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	2.18	3.98
v <sub>max</sub> [m/s]	1.91	2.16
H <sub>max</sub> [mm]	970	1350

## Il volume complessivamente emesso durante l'evento è riportato nella tabella 7.10:

Tabella 7.10 - Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 25 luglio 2021

	misura	Simulazione
V [m³]	6184.8	28227.6

### 7.2.2 Evento del 26/07/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 26 luglio, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità.



Figura 7.20 – Confronto tra la portata misurata il 26 luglio 2021 e la portata simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.21 – Confronto tra il livello misurato il 26 luglio 2021 ed il livello simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.22 – Confronto tra la velocità misurata il 26 luglio 2021 e la velocità simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento

# I valori massimi misurati e simulati sono elencati nella tabella 7.11:

Tabella 7.11 – Valori massimi misurati e simulati nell'evento del 26 luglio 2021

	misura	Simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	0.06	0.73
v <sub>max</sub> [m/s]	0.80	1.19
H <sub>max</sub> [mm]	110	500

## Il volume complessivamente emesso durante l'evento è riportato nella tabella 7.12:

Tabella 7.12 – Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 26 luglio 2021

	misura	Simulazione
V [m <sup>3</sup> ]	74.3	1543.1

### 7.2.3 Evento del 27/07/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 27 luglio, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità.



Figura 7.23 – Confronto tra la portata misurata il 27 luglio 2021 e la portata simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.24 – Confronto tra il livello misurato il 27 luglio 2021 ed il livello simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.25 – Confronto tra la velocità misurata il 27 luglio 2021 e la velocità simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento

I valori massimi misurati e simulati sono elencati nella tabella 7.13:

Tabella 7.13 – Valori massimi misurati e simulati nell'evento del 27 luglio 2021

	misura	Simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	0.07	0.42
v <sub>max</sub> [m/s]	0.82	0.99
H <sub>max</sub> [mm]	120	380

Il volume complessivamente emesso durante l'evento è riportato nella tabella 7.14:

Tabella 7.14 – Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 27 luglio 2021

	misura	Simulazione
V [m³]	148.5	1254.4

#### 7.2.4 Evento del 06/09/2021

La risposta del modello nei confronti dell'evento del 6 settembre, confrontata con quanto rilevato in campo, è descritta nelle figure seguenti. Le grandezze comparate sono le stesse di cui si ha disponibilità di registrazioni, ovvero portata, livello e velocità.



Figura 7.26 – Confronto tra la portata misurata il 6 settembre 2021 e la portata simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.27 – Confronto tra il livello misurato il 6 settembre 2021 ed il livello simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento



Figura 7.28 – Confronto tra la velocità misurata il 6 settembre 2021 e la velocità simulata con pioggia interpolata linearmente sul bacino e parametri del modello di riferimento

# I valori massimi misurati e simulati sono elencati nella tabella 7.15:

	Tabella 7.15 – Va	lori massimi m	nisurati e simulati	nell'evento del	6 settembre 2021
--	-------------------	----------------	---------------------	-----------------	------------------

	misura	Simulazione
Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	0.23	0.51
v <sub>max</sub> [m/s]	1.02	1.05
H <sub>max</sub> [mm]	250	420

## Il volume complessivamente emesso durante l'evento è riportato nella tabella 7.16:

Tabella 7.16 – Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 6 settembre 2021

	misura	Simulazione
V [m³]	225.7	1283.8

#### 7.2.5 Osservazioni

In 3 dei 4 eventi studiati la simulazione riproduce abbastanza bene i picchi di portata. Ciò non avviene però nell'evento del 25 luglio, nel quale vengono simulati due ulteriori picchi oltre a quelli misurati. Tale situazione potrebbe significare che il metodo di costruzione degli ietogrammi adottato è poco affidabile nel riprodurre la vera distribuzione della pioggia sul bacino.

I volumi simulati con questi ietogrammi si avvicinano a quelli registrati, ma risultano comunque maggiori. Partendo da tali risultati, occorre calibrare il modello, ovvero modificare i parametri di infiltrazione ed osservare come cambia la simulazione.

# 8. Calibrazione del modello

Questo capitolo, partendo dalle analisi sui risultati delle simulazioni condotte nel Capitolo 6, si concentra sulla calibrazione dei parametri del modello. I coefficienti di infiltrazione relativi a suoli di riferimento adottati finora verranno modificati con l'obbiettivo di arrivare a far coincidere il volume di deflusso simulato con quello misurato in corrispondenza del misurato di livello e velocità presente nella rete. I parametri verranno dapprima modificati sulla base delle simulazioni svolte con pioggia interpolata linearmente tra i due pluviometri installati nel bacino. Qualora non si ottengano risultati soddisfacenti, verrà testato un ulteriore metodo di modellazione della precipitazione.

#### 8.1 Calibrazione con eventi interpolati linearmente

Come visto nel Capitolo 5, nelle simulazioni iniziali sono stati adottati parametri di infiltrazione di riferimento relativi a varie tipologie di suolo elencati nel 1956 dal Soil Conservation Service (SCS): in particolare, i sottobacini meno permeabili sono stati modellati come suolo C, mentre quelli più permeabili come suolo A. I rispettivi parametri sono riportati nella tabella 8.1:

Tabella 8.1 – Parametri di infiltrazione di riferimento (SCS 1956)

Tipo di Suolo	f₀ [mm/h]	f <sub>c</sub> [mm/h]	k [1/h]
Suolo A	250	25.4	2
Suolo C	125	2.5	2

Per quanto riguarda le altezze delle depressioni superficiali (Depression Storage), inizialmente è stato assegnato un valore di 5 mm alle aree permeabili e 2 mm alle aree impermeabili.

Visto che dalle simulazioni sono risultati volumi di deflusso maggiori di quelli misurati, si è provato ad aumentare i parametri di infiltrazione ed i depression storage, in modo da rendere il suolo più permeabile e diminuire il volume recapitato dalla rete. Si iniziano ad osservare notevoli diminuzioni di volume ipotizzando i parametri riportati nelle tabelle 8.2 e 8.3:

f₀ [mm/h] f₅ [mm/h] k [1/h]				
450	35	4		

Tabella 8.2 – Parametri di infiltrazione modificati

Tabella 8.3 –	Valori	di depression	storage	adottati
---------------	--------	---------------	---------	----------

Tipo di suolo	Depression storage [mm]
Permeabile	10
Impermeabile	5

Con tali parametri, infatti si ottengono i risultati descritti nei paragrafi seguenti:





Figura 8.1 - Confronto tra la portata misurata il 25 luglio 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino con parametri del modello di riferimento e con parametri modificati I volumi emessi sono riportati nella tabella 8.4:

Tabella 8.4 - Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 25 luglio 2021 con parametri di riferimento e parametri modificati

	misura	Simulazione	Simulazione con
		grezza	parametri modificati
V [m³]	6184.8	28227.6	26608.7



# 8.1.2 Evento del 26/07/2021

Figura 8.2 - Confronto tra la portata misurata il 26 luglio 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino con parametri del modello di riferimento e con parametri modificati I volumi emessi sono riportati nella tabella 8.5:

Tabella 8.5 - Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 26 luglio 2021 con parametri di riferimento e parametri modificati

	misura	Simulazione	Simulazione con
		grezza	parametri modificati
V [m³]	74.3	1543.1	631.7

# 8.1.3 Evento del 27/07/2021



Figura 8.3 - Confronto tra la portata misurata il 27 luglio 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino con parametri del modello di riferimento e con parametri modificati

## I volumi emessi sono riportati nella tabella 8.6:

Tabella 8.6 - Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 27 luglio 2021 con parametri di riferimento e parametri modificati

	misura	Simulazione	Simulazione con
		grezza	parametri modificati
V [m³]	225.7	1283.8	555.3



# 8.1.4 Evento del 06/09/2021

Figura 8.4 - Confronto tra la portata misurata il 6 settembre 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino con parametri del modello di riferimento e con parametri modificati

#### I volumi emessi sono riportati nella tabella 8.7:

Tabella 8.7 - Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 6 settembre 2021 con parametri di riferimento e parametri modificati

	misura	Simulazione	Simulazione con	
		grezza	parametri modificati	
V [m³]	225.7	1283.8	555.3	

#### 8.1.5 Osservazioni

Rispetto alle simulazioni con parametri di infilltrazione di riferimento svolte nel Capitolo 6, in tutti i 4 eventi analizzati si riscontra una notevole diminuzione del volume di deflusso. Tuttavia, il volume ottenuto è ancora superiore a quello registrato e l'idrogramma simulato relativo all'evento del 25 luglio continua a riprodurre non correttamente i picchi di portata. Quest'ultimo problema potrebbe essere dovuto alla modellazione degli eventi di pioggia.

#### 8.2 letogrammi assegnati su aree di influenza dei pluviometri

Un'altra possibile costruzione degli ietogrammi consiste nell'assegnare a ciascun pluviometro un'area di influenza. Tutti i sottobacini presenti in tale zona saranno soggetti all'evento di pioggia registrato da quel pluviometro. In altri termini, a ogni sottobacino viene associato l'evento misurato dal pluviometro più vicino. La distanza viene calcolata a partire dai centroidi dei sottobacini.

Visto che nel bacino oggetto di studio sono presenti 2 pluviometri, ci saranno 2 aree di influenza, visibili nella figura 8.5:



Figura 8.5 - Aree di influenza dei due pluviometri installati sul bacino

Di conseguenza, tutti i sottobacini presenti nell'area colorata in blu saranno soggetti allo ietogramma registrato dal pluviometro PLUTO10, mentre quelli nell'area arancione saranno soggetti allo ietogramma registrato da PLUTO20.

Costruiti gli ietogrammi si procede alle simulazioni, i cui risultati sono riportati successivamente e confrontati con i precedenti. Per giudicare il miglioramento o peggioramento delle simulazioni, inizialmente si torna ad utilizzare i parametri di infiltrazione dei suoli di riferimento.

# 8.2.1 Evento del 25/07/2021



Figura 8.6 - Confronto tra la portata misurata il 25 luglio 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri del modello di riferimento

Tabella 8.8 - Volume di deflusso misurato nell'evento del 25 luglio 2021 e simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri di riferimento

	misura	Intensità mediate linearmente	Intensità assegnate per aree di influenza
V [m³]	6184.8	28227.6	20311.5

# 8.2.2 Evento del 26/07/2021



Figura 8.7 - Confronto tra la portata misurata il 26 luglio 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri del modello di riferimento

Tabella 8.9 - Volume di deflusso misurato nell'evento del 26 luglio 2021 e simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri di riferimento

	misura	Intensità mediate linearmente	Intensità assegnate per aree di influenza
V [m³]	74.3	1543.1	446.1

# 8.2.3 Evento del 27/07/2021



Figura 8.8 - Confronto tra la portata misurata il 27 luglio 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri del modello di riferimento

Tabella 8.10 - Volume di deflusso misurato nell'evento del 27 luglio 2021 e simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri di riferimento

	misura	Intensità mediate linearmente	Intensità assegnate per aree di influenza
V [m³]	148.5	1254.4	844.2

### 8.2.4 Evento del 06/09/2021



Figura 8.9 - Confronto tra la portata misurata il 6 settembre 2021 e la portata simulata per pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri del modello di riferimento

Tabella 8.11 - Volume di deflusso misurato nell'evento del 6 settembre 2021 e simulato con pioggia interpolata linearmente sul bacino e pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri di riferimento

	misura Intensità mediate		Intensità assegnate per	
		linearmente	aree di influenza	
V [m³]	225.7	1283.8	1729.1	

## 8.2.5 Osservazioni

Con quest'ultima modellazione degli ietogrammi, in tutti i 4 eventi il volume simulato tende ad avvicinarsi a quello misurato. Il maggiore miglioramento lo si ha nell'evento del 25 luglio, nel quale i picchi di portata vengono riprodotti fedelmente dal punto di vista temporale. Tuttavia, anche in questo caso i volumi sono sempre notevolmente maggiori di quelli registrati. Per provare a risolvere l'incongruenza tra i volumi di deflusso misurati e simulati si proverà a modificare i parametri, anche arrivando ad adottare valori poco realistici.

#### 8.3 Calibrazione del modello con ietogrammi assegnati su aree di influenza dei pluviometri

Fino ad ora si è osservato che il modello sovrastima il volume convogliato in rete. A questo punto, ci si chiede quali parametri del modello andrebbero adottati per far coincidere il volume simulato con quello misurato. Come mostrato nel grafico seguente, si arriva alla conclusione di dover usare valori non realistici: in particolare, il depression storage deve essere molto alto per diminuire il volume che entra in rete.

Ad esempio, nell'evento del 25 luglio 2021 è necessario adottare un depression storage pari a 60 mm per le aree permeabili e 30 mm per le aree impermeabili. Con questi valori, abbinati ai parametri di riferimento del metodo di Horton del suolo A e C si simula un volume erogato paragonabile alla quantità misurata:



Figura 8.10 - Confronto tra la portata misurata il 25 luglio 2021 e la portata simulata per pioggia spalmata sulle due aree di influenza con parametri del modello di riferimento e con parametri modificati

# Tabella 8.12 - Volume di deflusso misurato e simulato nell'evento del 25 luglio 2021 con parametri di riferimento e parametri modificati

	micura	Simulazione	Simulazione con
	misura	grezza	parametri modificati
V [m³]	6184.8	20311.5	5689.2

Sebbene il volume simulato sia prossimo a quello misurato, i picchi di portata simulata sono inferiori a quelli misurati.

A questo punto la precipitazione è stata modellata seguendo vari criteri, e i risultati ottenuti in termini di portata e conseguentemente volume sono risultati fortemente variabili. Questa incertezza di conserva anche modificando i parametri del modello, a testimonianza che le simulazioni sono fortemente influenzate da come viene distribuita la precipitazione sul bacino.

In ogni caso, il volume di deflusso simulato è sempre risultato maggiore di quello misurato, salvo modifiche ai parametri idraulici fino a valori inverosimili. Di conseguenza, è opportuno verificare l'affidabilità dei valori di portata registrati, per capire se siano verosimili o se invece siano erronei.

## 9. Validazione delle misure

Nel Capitolo 8 è emerso che i risultati sperimentali sono replicabili numericamente esclusivamente aumentando i parametri di infiltrazione fino a valori poco realistici per aree urbanizzate come quella oggetto di studio. Anche modellando la precipitazione in molteplici modi, non sono mai stati ottenuti volumi di deflusso coerenti con quanto registrato. Per queste ragioni, è lecito chiedersi se possa esserci un malfunzionamento nel misuratore di livello e velocità, dalle quali registrazione si ricava il valore di portata. Per capire se realmente le misure possano essere affette da errori sistematici, si possono trarre conclusione analizzando il coefficiente di deflusso, tralasciando i risultati simulati. L'idea consiste nel calcolare il coefficiente di deflusso per i 4 eventi di pioggia considerati, rapportando il volume misurato transitante nel collettore strumentato con il volume meteorico. Considerando che la maggior parte dei sottobacini coprono zone urbanizzate, i relativi coefficienti di deflusso non possono essere troppo bassi, in quanto la pioggia avrebbe poca possibilità di infiltrarsi nel suolo. Con questa analisi è anche possibile valutare i diversi metodi di modellazione dell'evento di pioggia. Se ne testano tre, dei quali due già utilizzati nelle simulazioni. Il primo consiste nella modellazione della precipitazione "a cono", ovvero nell'interpolazione lineare delle intensità misurate dai due pluviometri presenti nella rete. Questa modellazione è descritta nel paragrafo 5.2.1. Nel secondo metodo la pioggia viene divisa "a zone", assegnando un'area di competenza a ciascun pluviometro, come visto nel paragrafo 8.2. Infine, il terzo nuovo metodo prevede di considerare non solo i due pluviometri presenti nell'area, ma tutti i pluviometri disponibili nell'area metropolitana di Torino: istante per istante, si esegue una media ponderata sulla distanza delle intensità registrate dai 20 pluviometri installati nel territorio, ottenendo di conseguenza ietogrammi "mediati nello spazio".

#### 9.1 Calcolo dei coefficienti di deflusso sperimentali

Come detto, i coefficienti di deflusso sperimentali si calcolano rapportando il volume misurato transitante nel collettore strumentato con il volume meteorico:

$$c = \frac{V_{nel \ collettore}}{V_{meteorico}}$$

Per il calcolo del volume meteorico, è opportuno considerare che le intensità vengono campionate dai pluviometri ogni 15 minuti. Di conseguenza, si ottiene uno ietogramma a gradini. Il

volume viene quindi cumulato in due diversi modi: "a gradini", sommando le aree dei rettangoli sottesi alle intensità di durata pari a 15 minuti e "linearmente", interpolando linearmente i valori di intensità.

Riassumendo, per ognuno dei 4 eventi di pioggia considerati si avrà il volume in condotta registrato dal misuratore di portata e 6 valori di volume meteorico, dati dalle tre costruzioni dello ietogramma e dai due calcoli del volume. Come detto, rapportando il volume misurato in condotta con il volume meteorico si ottiene il coefficiente di deflusso. I risultati sono riportati di seguito.

#### 9.1.1 Evento del 25/07/2021

Nella figura 9.1 il volume di deflusso misurato nell'evento del 25 luglio viene confrontato con i volumi di deflusso calcolati per le diverse modellazioni della precipitazione:



Figura 9.1 – Confronto tra il volume misurato il 25 luglio 2021 ed i volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione
modellazione della precipitazione				
	ietogramma			
	a cono	a zone	nello spazio	
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	25334.16	23625.09	21455.68	
(pioggia a gradini)				
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	25241.81	20403.49	21038.31	
(pioggia lineare)				
Volume in condotta misurato		6184.77		
[m³]				

#### Tabella 9.1 – Volume misurato il 25 luglio 2021 e volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione

## Tabella 9.2 – Coefficienti di deflusso calcolati per i vari metodi di modellazione della

	ietogramma		
	a cono	a zone	nello spazio
Coefficiente di deflusso	0.24	0.26	0.29
(pioggia a gradini)			
Coefficiente di deflusso	0.25	0.30	0.29
(pioggia lineare)			

#### 9.1.2 Evento del 26/07/2021

Nella figura 9.2 il volume di deflusso misurato nell'evento del 26 luglio viene confrontato con i volumi di deflusso calcolati per le diverse modellazioni della precipitazione:



# Figura 9.2 – Confronto tra il volume misurato il 26 luglio 2021 ed i volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione

#### Tabella 9.3 – Volume misurato il 26 luglio 2021 e volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione

	ietogramma		
	a cono	a zone	nello spazio
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	2550.12	1687.51	2055.09
(pioggia a gradini)			
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	1575.72	1035.52	1634.81
(pioggia lineare)			
Volume in condotta misurato		74.34	
[m³]			

Tabella 9.4 – Coefficienti di deflusso calcolati per i vari metodi di modellazione della

	ietogramma		
	a cono	a zone	nello spazio
Coefficiente di deflusso (pioggia a gradini)	0.03	0.04	0.04
Coefficiente di deflusso (pioggia lineare)	0.05	0.07	0.05

#### 9.1.3 Evento del 27/07/2021

Nella figura 9.3 il volume di deflusso misurato nell'evento del 27 luglio viene confrontato con i volumi di deflusso calcolati per le diverse modellazioni della precipitazione:



# Figura 9.3 – Confronto tra il volume misurato il 27 luglio 2021 ed i volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione

#### Tabella 9.5 – Volume misurato il 27 luglio 2021 e volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione

	ietogramma		
	a cono	a zone	nello spazio
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	2386.48	2147.74	3592.60
(pioggia a gradini)			
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	2063.25	1879.27	3406.83
(pioggia lineare)			
Volume in condotta misurato		148.50	
[m³]			

Tabella 9.6 – Coefficienti di deflusso calcolati per i vari metodi di modellazione della

	ietogramma		
	a cono	a zone	nello spazio
Coefficiente di deflusso (pioggia a gradini)	0.06	0.07	0.04
Coefficiente di deflusso	0.07	0.08	0.04
(pioggia lineare)			

#### 9.1.4 Evento del 06/09/2021

Nella figura 9.4 il volume di deflusso misurato nell'evento del 6 settembre viene confrontato con i volumi di deflusso calcolati per le diverse modellazioni della precipitazione:



# Figura 9.4 – Confronto tra il volume misurato il 6 settembre 2021 ed i volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione

#### Tabella 9.7 – Volume misurato il 6 settembre 2021 e volumi calcolati con i vari metodi di modellazione della precipitazione

	ietogramma		
	a cono	a zone	nello spazio
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	2537.70	3068.19	3157.00
(pioggia a gradini)			
Volume meteorico [m <sup>3</sup> ]	1903.28	1534.10	2803.97
(pioggia lineare)			
Volume in condotta misurato		225.70	
[m³]			

Tabella 9.8 – Coefficienti di deflusso calcolati per i vari metodi di modellazione della

	ietogramma		
	a cono	a zone	nello spazio
Coefficiente di deflusso (pioggia a gradini)	0.09	0.07	0.07
Coefficiente di deflusso (pioggia lineare)	0.12	0.15	0.08

#### 9.1.5 Osservazioni

Sono stati ottenuti coefficienti di deflusso piuttosto bassi, considerando il carattere urbanizzato della zona. I coefficienti più alti si riscontrano nell'evento del 25 luglio, ma comunque essi non superano il 30%, mentre negli altri eventi sono rari i casi in casi raggiunge il 10%. Per ottenere valori simili il suolo dovrebbe essere molto permeabile, ma questa situazione non è veritiera vista la quantità di superfici impermeabili presente nell'area. I risultati ottenuti sono quindi coerenti con un possibile malfunzionamento del misuratore di portata, che sottostima i volumi effettivamente transitanti.

#### 9.2 Coefficienti di deflusso simulati

È utile inoltre analizzare i coefficienti di deflusso di ogni sottobacino calcolati nelle simulazioni. L'idea consiste nel confrontare il massimo coefficiente di deflusso con la morfologia del rispettivo sottobacino per verificarne la congruenza. I valori sono presi dalle simulazioni riportate nel paragrafo 7.2, condotte con pioggia divisa in aree di influenza dei pluviometri, in quanto questa modellazione è risultata essere la più verosimile.

#### • Evento del 25/07/2021

Il coefficiente di deflusso massimo risulta pari a 0.45, relativo al sottobacino rappresentato nella seguente immagine:



Figura 9.5 – Immagine satellitare del sottobacino con coefficiente di deflusso simulato massimo nell'evento del 25 luglio 2021

#### • Evento del 26/07/2021

Il coefficiente di deflusso massimo risulta pari a 0.45, relativo al sottobacino rappresentato nella seguente immagine:



Figura 9.6 – Immagine satellitare del sottobacino con coefficiente di deflusso simulato massimo nell'evento del 26 luglio 2021

### • Evento del 27/07/2021

Il coefficiente di deflusso massimo risulta pari a 0.45, relativo al sottobacino rappresentato nella seguente immagine:



Figura 9.7 – Immagine satellitare del sottobacino con coefficiente di deflusso simulato massimo nell'evento del 27 luglio 2021

#### • Evento del 06/09/2021

Il coefficiente di deflusso massimo risulta pari a 0.45, relativo al sottobacino rappresentato nella seguente immagine:



Figura 9.8 – Immagine satellitare del sottobacino con coefficiente di deflusso simulato massimo nell'evento del 6 settembre 2021

In tutti questi sottobacini si trovano superfici poco permeabili, come strade ed edifici ed alcune aree verdi: si può concludere anche in questo caso che i coefficienti di deflusso ottenuti sono inferiori rispetto a quelli attesi.

#### 10. Conclusioni

In questa tesi è stato analizzare numericamente il comportamento di una rete di drenaggio delle acque meteoriche che serve parte della zona a Nord-Est del territorio comunale di Torino, scaricando le acque nel Po e nella Stura. Ciò ha permesso di ampliare la conoscenza della rete, considerando che gli ultimi studi svolti risalivano agli anni '70, quando i regimi di pioggia erano diversi e non erano ancora disponibili i moderni modelli numerici.

Innanzitutto, la modellazione dei vari tratti ha evidenziato le carenze nei dati iniziali relativi alle quote altimetriche e alle dimensioni dei collettori e dei pozzetti. Sfruttando la collaborazione tra il Politecnico di Torino e SMAT, è stato possibile esporre e segnalare i problemi a quest'ultima, ovvero la società responsabile del servizio idrico integrato. La richiesta di verifiche in loco ha portato all'ampliamento delle informazioni di partenza, oltre all'aggiornamento delle cartografie della rete.

Il modello ottenuto è stato ulteriormente affinato attraverso le prime simulazioni: usando due eventi di pioggia di progetto molto intensi associati ad un tempo di ritorno di 5 anni, di durata pari a un'ora e 10 minuti, sono stati evidenziati nuovi errori geometrici nel modello, sfuggiti nel controllo preliminare dei dati. Inoltre, vista la gravità degli eventi adottati, è stato possibile individuare le zone più critiche dell'infrastruttura. È risultato che la rete risponde bene nei confronti di eventi di durata pari oraria, mentre va in crisi in diversi punti per eventi molto intensi di durata più breve. Per comprenderne il motivo, sono stati analizzati i profili e le planimetrie delle zone più sollecitate.

In seguito, grazie alle misure pluviometriche di due pluviometri presenti nel bacino è stato anche possibile studiare eventi realmente accaduti. In particolare, si aveva disponibilità di dati registrati nell'estate 2021. Si è sfruttata l'occasione di poter confrontare i risultati delle simulazioni in termini di portata, velocità e livello con le stesse grandezze registrate da un misuratore di livello e velocità presente in un collettore della rete. Dai dati pluviometrici disponibili, sono state associate diversi ietogrammi a ciascun sottobacino nel quale la totalità dell'area era stata discretizzata: inizialmente, a tutti i sottobacini era stato assegnato lo ietogramma registrato dal pluviometri sono state interpolate linearmente per ogni istante di misura, in modo da assegnare un diverso ietogramma ad ogni sottobacino che tenesse conto della distanza dai punti di misurazione. La modellazione migliore della precipitazione è risultata essere la prima, in quanto riproduceva meglio sequenza temporale dei picchi di portata. Tuttavia, in entrambi i casi i volumi di deflusso simulati sono risultati

nettamente maggiore di quelli misurati. Tali esiti erano prevedibili, in quanto nel modello erano stati finora usati valori di letteratura dei parametri di infiltrazione. Si è quindi provato a modificare questi parametri, nella fattispecie aumentandoli facendo di conseguenza diminuire il volume di deflusso. Pur aggiungendo un terzo metodo di costruzione della precipitazione, nel quale dopo aver assegnato aree di influenza ai due pluviometri si associava ai vari sottobacini la misurazione raccolta dal pluviometro più vicino, è stato concluso che l'unico modo per raggiungere la coincidenza tra l'idrogramma simulato e quello misurato era aumentare i parametri di infiltrazione fino a valori poco realistici. A quel punto, è stato lecito chiedersi se le portate misurate fossero verosimili oppure erronee.

Il calcolo dei coefficienti di deflusso come rapporto tra il volume misurato nel collettore strumentato ed il volume meteorico cumulato durante gli eventi registrati ha portato a valori piuttosto bassi, verosimili esclusivamente in territori molto permeabili. Stesso esito si ottiene anche analizzando i coefficienti di deflusso derivanti dalle simulazioni, dove si riscontrano valori inferiori a quelli attesi dal carattere fortemente urbanizzato della zona. Queste considerazioni non hanno permesso di calibrare adeguatamente i parametri di infiltrazione del modello. Tuttavia, la validazione delle misure ha fornito ulteriori indicazioni su quale metodo di modellazione della precipitazione potesse essere il compromesso migliore: la suddivisione degli ietogrammi sulle aree di influenza dei pluviometri comporta la più soddisfacente riproduzione dei picchi di portata registrati nel collettore ed i valori di coefficienti di deflusso più vicini a quelli attesi.

In conclusione, le simulazioni hanno evidenziato la forte dipendenza dei risultati ottenuti con la precipitazione in ingresso. Sono state infatti individuate notevoli differenze nei volumi di deflusso relativi alle varie modellazioni degli eventi di pioggia sul bacino. Il probabile errore si trova all'interno dai parametri quali livello o velocità e non permette di avere certezza assoluta del metodo migliore, oltre ad impedire la corretta calibrazione del modello. Per future modellazioni numeriche delle reti di drenaggio urbano sarà quindi fondamentale verificare le registrazioni disponibili validando le misurazioni ottenute.

### Bibliografia e sitografia

- Città di Torino, Divisione infrastrutture e mobilità, servizio ponti, vie d'acqua e infrastrutture (2019) – Linee guida per la progettazione di fognature
- Ing. P. Sassi, Enydros (2021) Campagna di monitoraggio delle portate transitanti nella rete scolante pluviale del comune di Torino (TO)
- Ispra (2021) gli indicatori del clima in Italia nel 2020, anno XVI
- Ispra (2021) comunicato stampa, ISPRA presenta il clima in Italia nel 2020 e il trend 1961/2020
- Prof. F. Boano, Ing. F. Raviola, Prof. L. Ridolfi, Prof. R. Vesipa (2022) Modellazione idraulica della rete di drenaggio urbano della città di Torino, bacino di Via Varano – Via Nevio, riassunto del modello SWMM e risultati delle simulazioni
- Geoportale della regione Piemonte ripresa aerea ICE 2009-2011, DTM 5m https://www.geoportale.piemonte.it/geonetwork/srv/ita/catalog.search#/metadata/r\_ piemon:224de2ac-023e-441c-9ae0-ea493b217a8e
- Geoportale del comune di Torino (2011) cartografia in scarico http://geoportale.comune.torino.it/web/cartografia/cartografia-scarico
- Geoportale di ARPA Piemonte (2013) atlante delle piogge intense in Piemonte https://webgis.arpa.piemonte.it/agportal/apps/webappviewer/index.html?id=378e0fc b7ddd4565ba836c07dd1c4c9b