

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Validazione del modello idraulico in SWMM
della rete di drenaggio di Torino nel rione
Borgo Dora**



Relatore:

Prof. Fulvio Boano

Correlatore:

Ing. Marco Scibetta (SMAT s.p.a.)

Candidato:

Manrico Marchetta

Ottobre 2020

Indice

INTRODUZIONE	1
1 CAPITOLO I.....	5
1.1 Premessa	5
1.2 Il ciclo dell'acqua	8
1.3 I modelli di trasformazione afflussi-deflussi	15
1.4 Sistemi di drenaggio urbano	23
1.4.1 Cenni storici.....	24
1.4.2 Impianti di fognatura	27
1.4.3 La geometria delle sezioni degli spechi di fognatura	31
1.4.4 Materiali costituenti i collettori	34
1.4.5 Criteri di dimensionamento dei collettori.....	36
2 CAPITOLO II	42
2.1 L'area oggetto di studio	42
2.2 Cenni storici.....	43
2.3 Origine del lavoro	48
2.4 Descrizione della rete	51
2.4.1 Aree drenate.....	53
2.4.2 Collettori.....	56
3 CAPITOLO III.....	63
3.1 Il software di calcolo SWMM	64
3.2 La struttura del programma SWMM	67
3.3 Descrizione dei moduli di SWMM.....	70
3.4 I moduli di progetto di SWMM.....	73
3.4.1 Modulo idrologico (<i>Hydrology</i>)	76
3.4.2 Modulo idraulico (<i>Hydraulics</i>)	78

3.4.2.1	I nodi	80
3.4.2.2	I collegamenti o rami	81
3.4.3	Modulo qualità (Quality)	85
3.5	Opzioni di simulazione	86
3.5.1	Deflusso superficiale	87
3.5.1.1	Partizionamento del sottobacino	90
3.5.2	Infiltrazione (Infiltration)	92
3.5.2.1	Il metodo di Horton	94
3.5.2.2	Il metodo di Horton modificato	95
3.5.2.3	Il metodo Green-Ampt	96
3.5.2.4	Il metodo del Curve Number	97
3.5.2.5	Modello dell'onda dinamica	104
4	CAPITOLO IV	109
4.1	Eventi registrati	111
4.2	Calibrazione e validazione del modello	119
4.3	La calibrazione in <i>SWMM</i>	120
4.3.1	Dati di Calibrazione	120
4.3.2	File di calibrazione	120
4.3.3	Visualizzazione di tutti i dati del progetto	122
4.4	Le fasi della calibrazione	122
4.5	I risultati della simulazione	125
	CONCLUSIONI	138
	BIBLIOGRAFIA	141
	SITOGRAFIA	143

INTRODUZIONE

Il processo di antropizzazione del territorio si è intensificato in maniera esponenziale negli ultimi decenni, in particolare dall'inizio del '900, in rapporto all'incremento delle potenzialità offerte dalla tecnologia. Si sono verificate profonde trasformazioni in merito l'uso del suolo, a causa di vari processi che hanno comportato eccessivi interventi sul territorio come l'urbanizzazione, l'industrializzazione e la coltivazione di vaste aree.

Pertanto, la salvaguardia idraulica del territorio non riguarda solamente le problematiche relative alle inondazioni, bensì, anche il drenaggio delle aree urbane, così da regolare le acque meteoriche in eccesso e convogliarle in un sistema di canalizzazioni, manufatti, macchinari e apparecchiature che possano accumulare e allontanare dai centri urbani sia le acque di pioggia sia quelle reflue prodotte dai diversi usi della società: usi domestici, pubblici, artigianali e industriali. Un sistema che viene realizzato per risolvere, almeno in parte, tali problematiche è definito sistema di drenaggio. La sua progettazione è fortemente correlata alla conoscenza delle precipitazioni che vengono, a loro volta, trasformate in portate attraverso vari modelli di trasformazione afflussi-deflussi.

Il presente lavoro di tesi ha riguardato la validazione del modello idraulico realizzato col software *EPA-SWMM* (*Storm Water Management Model* o modello di gestione delle acque piovane), relativo al sistema di drenaggio urbano del rione Borgo Dora nella città di Torino. Il modello idraulico in questione è stato realizzato a partire dalla collaborazione tra la *SMAT*¹ e il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (*DIATI*) del Politecnico di

¹ La *SMAT* (acronimo di Società Metropolitana Acque Torino S.p.a) è un'azienda che opera nel campo del servizio idrico integrato. Essa è nata nel 2001 a seguito della fusione tra l'Azienda acque metropolitane Torino S.p.A. e l'Azienda Po Sangone. Il Comune di Torino detiene direttamente o indirettamente il 65% delle azioni, mentre buona parte delle restanti azioni sono in possesso degli altri comuni serviti dalla *SMAT*. Oggi si occupa in particolare di:

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

Torino. Il contratto di ricerca fra i due organi è stato sottoscritto a seguito dell'evento temporalesco di forte intensità abbattutosi sulla città di Torino il 29 agosto 2016, e durante il quale si sono verificati allagamenti nella zona di Borgo Dora, precisamente in via Andreis, in via Andreis interno 18 e in via Borgo Dora. In particolare, la schematizzazione del modello idraulico della rete di drenaggio e le varie considerazioni idrologiche statuite sono il risultato dell'attività di ricerca redatta dal Prof. Fulvio Boano, dall'Ing. Stefano Losero e dal Prof. Luca Ridolfi.

Il presente lavoro di tesi è stato così suddiviso nei seguenti 4 capitoli:

Capitolo 1: Brevemente viene descritto cosa s'intende per evento alluvionale, focalizzandosi nel merito della normativa a livello nazionale ed europea, per poi concentrarsi sugli effetti negativi che l'urbanizzazione ha provocato. In particolare, si fa riferimento all'impermeabilizzazione dei suoli e trasformazione del percorso delle acque di deflusso. Ne consegue la precisazione di cosa sia il fenomeno del ciclo dell'acqua, per poi soffermarsi sulla descrizione dettagliate di quelli che sono i modelli di trasformazione afflussi-deflussi e a cosa servono. In ultima istanza, si chiarisce cos'è un sistema di drenaggio urbano, com'è composto e qual è la sua funzione.

Capitolo 2: Nel secondo capitolo viene affrontata l'area che è stata oggetto di studio, delineando la rete di drenaggio urbana dell'area stessa. L'attenzione è focalizzata sulla storia socio-culturale del rione di Borgo Dora, sulle trasformazioni che lo stesso ha subito e sulla sua riqualificazione. Inoltre, vengono spiegate le ragioni che hanno condotto all'inizio del lavoro di questa tesi.

Capitolo 3: Nel capitolo 3 prosegue l'ampia descrizione della struttura e delle funzionalità che governano il software di calcolo SWMM, adottato per la realizzazione del modello idraulico della rete di drenaggio. Si effettua una specifica definizione dei moduli costituenti il software, i quali permettono di modellare i vari elementi presenti nella rete fognaria. Inoltre, l'obiettivo del presente lavoro ha condotto a realizzare una valutazione delle varie opzioni di simulazione, definendo quelli che sono i diversi processi fisici, cioè di deflusso superficiale, di infiltrazione e del modello dell'onda dinamica.

Capitolo 4: Il quarto e ultimo capitolo è dedicato alla complessa fase di calibrazione del modello. In particolare, questa fase è stata eseguita con estrema attenzione e scrupolo, confrontando meticolosamente i risultati forniti dalle simulazioni con i dati misurati. Sono stati calibrati alcuni parametri del modello, in modo da potersi avvalere di un modello che sia in grado di rispecchiare in maniera efficace la realtà fisica dei fenomeni. Una volta conclusa la fase di calibrazione si è passati alla fase successiva, ovvero alla procedura di validazione del modello.

1 CAPITOLO I

1.1 Premessa

Quando si parla di "alluvione" si fa riferimento, ordinariamente, alla fuoriuscita delle acque dal letto di un corso d'acqua con successivo allagamento delle aree circostanti. Il termine "evento alluvionale" invece, è più generico e indica l'avvenimento di piogge intense e/o prolungate che provocano effetti e disagi sul territorio, come inondazioni, frane, danni da pioggia.

I principali riferimenti normativi nazionali in materia di "alluvioni" e di "eventi alluvionali" sono la L. 183/89 e il D.L. 180/98 (convertito in L. 267/98). A livello europeo, i riferimenti fondamentali sono: la Direttiva 2000/60/CE per la protezione delle acque superficiali, di transizione, costiere e sotterranee per una migliore mitigazione degli effetti delle inondazioni e della siccità; la Direttiva 2007/60/CE, la cosiddetta "Direttiva alluvioni", che ha istituito "un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni all'interno della Comunità".

La pubblicazione della Direttiva Europea 2007/60/CE (23/10/2007) per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni ha scaturito, per tutti i paesi comunitari, una crescente percezione nei confronti del rischio di allagamento. Consapevolezza, poi, che si è intensificata negli ultimi anni in seguito a numerosi eventi in ambito sia europeo (Polonia nel 2002, Gran Bretagna nel 2004 e 2007, in Ungheria, Germania e Repubblica Ceca nel 2013, ecc.) sia nazionale (eventi alluvionali in Sicilia nel 2009, Veneto e Campania nel 2010, Liguria-Toscana nel 2011, Sardegna nel 2013, ecc.).

Dai dati raccolti dall'osservatorio internazionale dei disastri, emerge che una quota rilevante dei danni economici complessivamente causati in Europa da disastri naturali siano da imputare agli eventi alluvionali (circa la metà del danno medio annuale, che ammonta a ~7,5 miliardi di Euro).

Facendo riferimento al contesto italiano, si noti come stia crescendo la consapevolezza di una minaccia idrogeologica nella scena pubblica, sia da parte dei tecnici preposti alle attività di difesa idraulica del territorio (ad es. pianificazione territoriale, progettazione e realizzazione degli interventi di mitigazione del rischio alluvionale, attività di protezione civile, ecc.), sia da parte dell'opinione pubblica.

Il fenomeno di antropizzazione del territorio da parte dell'uomo altera, di anno in anno, il fragile equilibrio tra processi naturali e insediamenti artificiali, abitativi, industriali e produttivi senza tenere in considerazione gli aspetti che caratterizzano, in modo significativo, il comportamento idrologico e idraulico del territorio.

In particolare, la comprensione e l'accurata rappresentazione dei processi idrologici che presiedono alla formazione del normale deflusso superficiale, e al suo trasferimento lungo il reticolo drenante, risulta di fondamentale importanza; sia per quello che riguarda la previsione e il controllo dei fenomeni alluvionali sia per quello che riguarda smottamenti e frane.

A seguito dell'espansione demografica avvenuta nel secondo dopoguerra e, di conseguenza, alla necessità di ricostruire le città in tempi brevi, è stato provocato uno stravolgimento delle naturali vie di scorrimento delle acque. Difatti, un'alta percentuale di impermeabilizzazione del suolo sconvolge e modifica, significativamente, il normale deflusso delle acque, così da provocare notevoli aumenti delle portate idriche in tempi molto ristretti all'interno dei canali adibiti ad accogliere le suddette acque.

La ricerca di soluzioni ingegneristiche che siano sempre più efficaci ed efficienti alla messa in sicurezza del territorio, dalle campagne alle città, rappresenta un obiettivo di fondamentale importanza per gli organi di controllo e di gestione delle acque meteoriche. La difesa del suolo deve rispondere al criterio di efficacia ed efficienza, poiché, tutti gli interventi sono sostenuti in maniera diretta o indiretta dagli abitanti della zona per tutelare gli stessi. È proprio in questo scenario che si colloca l'approccio di modellazione idraulica.

Una metodologia con la quale si è in grado di rispondere sia al criterio dell'efficienza, in quanto permette una valutazione sintetica precisa e rapida delle problematiche attuali e future, sia al criterio di efficacia, in quanto è possibile pianificare, controllare e accertare gli effetti di un intervento eseguito nel passato o da realizzare in futuro consentendo il miglior utilizzo possibile delle risorse economiche destinate alla difesa del suolo; di per se molto limitate e spesso, già a priori, non sufficienti.

Risulta evidente, dunque, l'importanza di poter usufruire di strumenti e competenze mirate nell'interesse collettivo sia dal punto di vista della sicurezza personale e sia dei beni esposti al rischio, nonché dal punto di vista economico, siccome una migliore gestione di fondi e finanziamenti permette una corretta gestione di aree sempre più vaste con ottimi risultati.

L'istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (*ISPRA*) ha sviluppato un indicatore che fornisce informazioni sugli eventi alluvionali che si sono verificati a seguito di fenomeni meteorici rilevanti e, che si sono abbattuti sul territorio nazionale nel corso degli ultimi anni.

I dati, ottenuti da rapporti tecnici *ISPRA* e/o report tecnici dell'agenzia regionale per la protezione ambientale (*ARPA*) e/o dai Centri Funzionali delle Regioni, riguardano nel dettaglio il numero di vittime e l'entità delle risorse necessarie al ripristino dei danni e/o alla mitigazione del rischio. In particolare, sul territorio nazionale si sono abbattuti eventi intensi caratterizzati da elevati volumi di piogge concentrate molto spesso nell'arco di una giornata o addirittura in poche ore, e che hanno causato vere e proprie "bombe d'acqua" sia in ambito urbanizzato che rurale.

Rotture degli argini, fenomeni erosivi, frane, fenomeni di sovralluvionamento, esondazioni e mareggiate costiere hanno da sempre interessato un territorio fragile come quello italiano che, per questo motivo, evidenzia un'elevata propensione al dissesto.

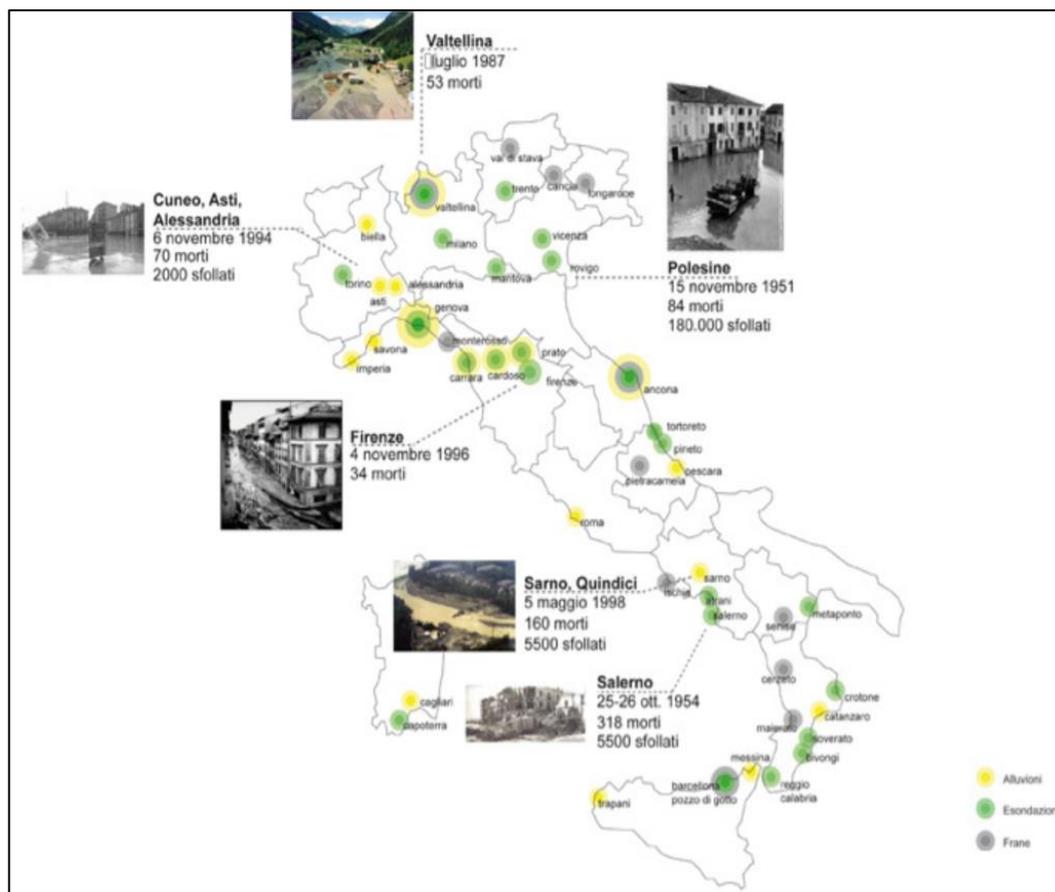


Figura 1: L'Atlante delle alluvioni. Gli eventi più gravi sul territorio nazionale dagli anni '50 ad oggi (Legambiente, 2019).

Negli ultimi decenni, tuttavia, a tale componente naturale si vanno a sovrapporre gli effetti dovuti sia alla trasformazione che il territorio urbanizzato ha progressivamente subito, sia alle modifiche che il clima tende a mostrare su scala globale; ovvero ciò che in Italia si traduce in aumento delle temperature, in riduzione complessiva delle precipitazioni e nella anomala distribuzione delle stesse in intervalli di tempo estremamente ridotti.

1.2 Il ciclo dell'acqua

L'acqua è da sempre la risorsa più preziosa per la vita dell'essere umano e per tutti gli ecosistemi naturali presenti sulla Terra, infatti è alla base di tutte le

forme di vita conosciute. Il nostro pianeta è ricoperto per circa il 70% da acqua e la maggior parte di questa non è utilizzabile direttamente, in quanto necessita di particolari trattamenti che sono diversificati a seconda dell'utilizzo cui l'acqua è destinata.

Il volume di acqua presente sulla Terra è stimato in circa 1'360'000'000 km³. L'acqua dolce ne rappresenta solo il 3% del volume totale e solo meno dell'1% dell'acqua dolce si trova in superficie sottoforma di laghi, fiumi, stagni o bacini ed è, così, facilmente accessibile.

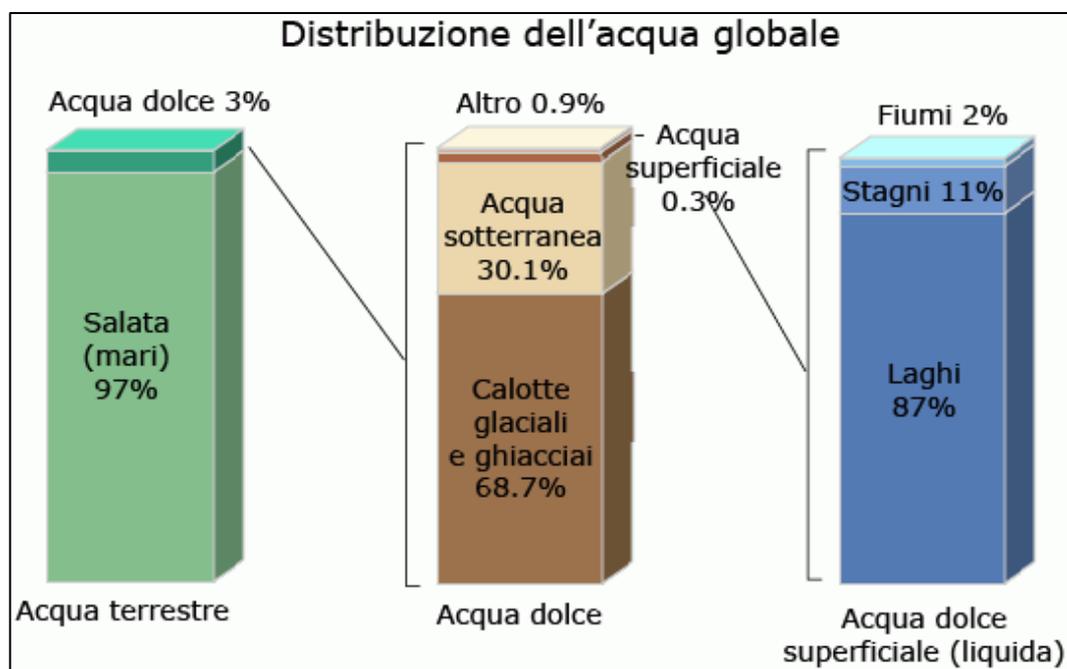


Figura 2: Distribuzione dell'acqua sul globo (USGS science for changing world, 2012).

A seconda della loro provenienza, le acque naturali si classificano in:

- acque meteoriche (pioggia, neve, grandine);
- acque sotterranee (falde profonde o freatiche);
- acque superficiali (mari, fiumi, laghi, sorgenti).

Inoltre l'acqua è una risorsa che si rinnova annualmente secondo quel meccanismo che si definisce "ciclo dell'acqua" o "ciclo idrologico".

Si tratta di un complesso insieme di fenomeni nel quale hanno primaria importanza la vegetazione e la sua diversità, il naturale scorrere di corsi d'acqua e la presenza di suolo naturale non compromesso dall'uomo.



Figura 3: Schema del ciclo dell'acqua (The Water Cycle, Italian – USGS, 2017).

Il processo è molto importante, poiché garantisce una continua rigenerazione dell'acqua che, altrimenti, una volta consumata si esaurirebbe e ciò comporterebbe che la vita sulla Terra finisca. Difatti, l'acqua è una risorsa vitale per tutti: esseri umani, animali, piante, ed è indispensabile nell'uso civile, agricolo e industriale.

L'uso dell'acqua per l'irrigazione dei campi è quello dominante, difatti sull'intero globo è pari a circa 2700 km³ in un anno contro i 500 km³ per le industrie ed i 200 km³ per gli usi domestici e personali.

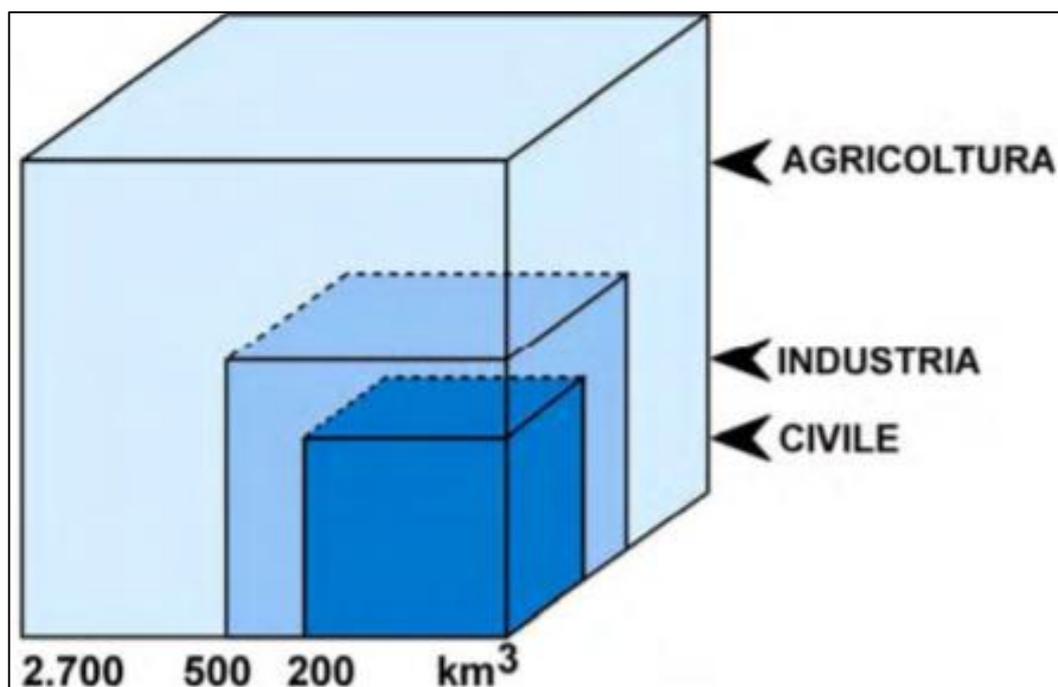


Figura 4: Utilizzo medio annuo dell'acqua nel globo (Forneris G., Pascale M., Perosino G.C., Zaccara P., 2008).

La distribuzione dell'acqua sul globo è governata da un continuo scambio di materia ed energia tra l'atmosfera e il suolo, le acque superficiali e le acque profonde, nonché tra gli esseri viventi.

Per effetto dell'irraggiamento solare, l'acqua presente negli oceani e quella contenuta nei laghi e nei fiumi evaporano nell'aria. Contemporaneamente, sul continente e, sempre per l'azione del sole, si ha il fenomeno dell'evapotraspirazione, ovvero quel processo in cui l'acqua traspirata dagli esseri viventi, principalmente dalle piante ed evaporata dal sole, apporta vapore all'aria. Una piccola quantità d'acqua nell'atmosfera proviene dalla sublimazione, cioè il passaggio diretto dallo stato solido (ghiaccio, neve, brina) allo stato gassoso, senza passare per lo stato liquido, saltando completamente la fase di fusione. Le correnti d'aria ascensionali sollevano il vapore in alto nell'atmosfera sino agli strati più freddi, nei quali si ha la condensazione in goccioline microscopiche che vanno, poi, a formare le nuvole.

I venti trasportano le nubi per il mondo e dopo un percorso più o meno lungo, le particelle d'acqua formanti le nubi condensano e si uniscono tra di loro

per formare delle gocce, più grandi e pesanti a sufficienza da cadere dal cielo sotto forma di precipitazione, ovvero: pioggia, neve, grandine o semplicemente nebbia, alimentando ulteriormente le acque superficiali, gli oceani e in parte le acque sotterranee, e infiltrandosi nel terreno così da alimentare gli acquiferi; i corpi rocciosi in grado di trattenere acqua a sufficienza per poi farla riaffiorare naturalmente in superficie attraverso sorgenti oppure estraendola con pozzi o gallerie.

Nei climi più freddi, l'acqua dovuta alle precipitazioni resta come intrappolata in ghiacciai o nevai per lunghi periodi di tempo. Per cui, i ghiacciai si possono considerare come l'ultima riserva d'acqua perfettamente intatta del pianeta. Il loro scioglimento implica la perdita di una riserva potenzialmente strategica per l'umanità.

Tutta l'acqua che scorre in superficie e nel sottosuolo tenderà ad arrivare nei mari e negli oceani, da cui poi evaporerà e formerà, nuovamente, le nuvole per ricominciare il medesimo ciclo idrologico.

In realtà, l'attività dell'uomo altera non solo l'ambiente, ma anche i processi idrologici. Difatti, l'urbanizzazione ha provocato delle alterazioni al ciclo dell'acqua e ha generato squilibri sugli ecosistemi, con le continue modifiche portate sul suolo o sulla vegetazione, soprattutto per quanto riguarda i fenomeni di evaporazione e traspirazione. Infatti, con la continua impermeabilizzazione dei suoli attraverso la realizzazione di infrastrutture ed elementi strutturali come strade, parcheggi, tetti, cortili, marciapiedi e altro ancora, è stato impedito all'acqua di filtrare nel terreno, così da contribuire all'incremento dello scorrimento superficiale e quindi, le portate nei fiumi provocano un abbassamento dell'infiltrazione, dell'evapotraspirazione e dell'alimentazione delle falde.

Le gocce d'acqua che precipitano dal cielo su di un suolo naturale e ricco di sostanze organiche e fertili, con una composizione granulometrica della frazione detritica minerale eterogenea, vengono gradualmente assorbite per penetrare in profondità, saturando il suolo stesso fino a giungere, nel caso di piogge prolungate, a incrementare le risorse sotterranee. L'acqua che rimane in superficie ad

alimentare il deflusso superficiale è ben poca. Per esempio, l'acqua che precipita su una superficie erbosa è assorbita per circa l'80 % dal suolo e solo il 20 % è allontanata per scorrimento; nel caso di un bosco l'assorbimento è ancora maggiore. L'acqua che precipita su una superficie asfaltata è allontanata quasi tutta e ben poca di essa penetra in profondità.

Nella figura 5 sono riportate le modalità di formazione dei deflussi totali. Una parte delle acque delle precipitazioni evapora prima ancora di toccare il suolo o immediatamente appena giunto su di esso, oppure risale lentamente attraverso l'evapotraspirazione dei vegetali. Un'altra porzione, invece, penetra nel sottosuolo e può ritornare nell'atmosfera, sia per evaporazione diretta e sia per evapotraspirazione, oppure (o anche contemporaneamente) può alimentare i deflussi attraverso le sorgenti e i collegamenti falda-fiume. Un'altra aliquota, poi, scorre sulla superficie per alimentare direttamente i deflussi.

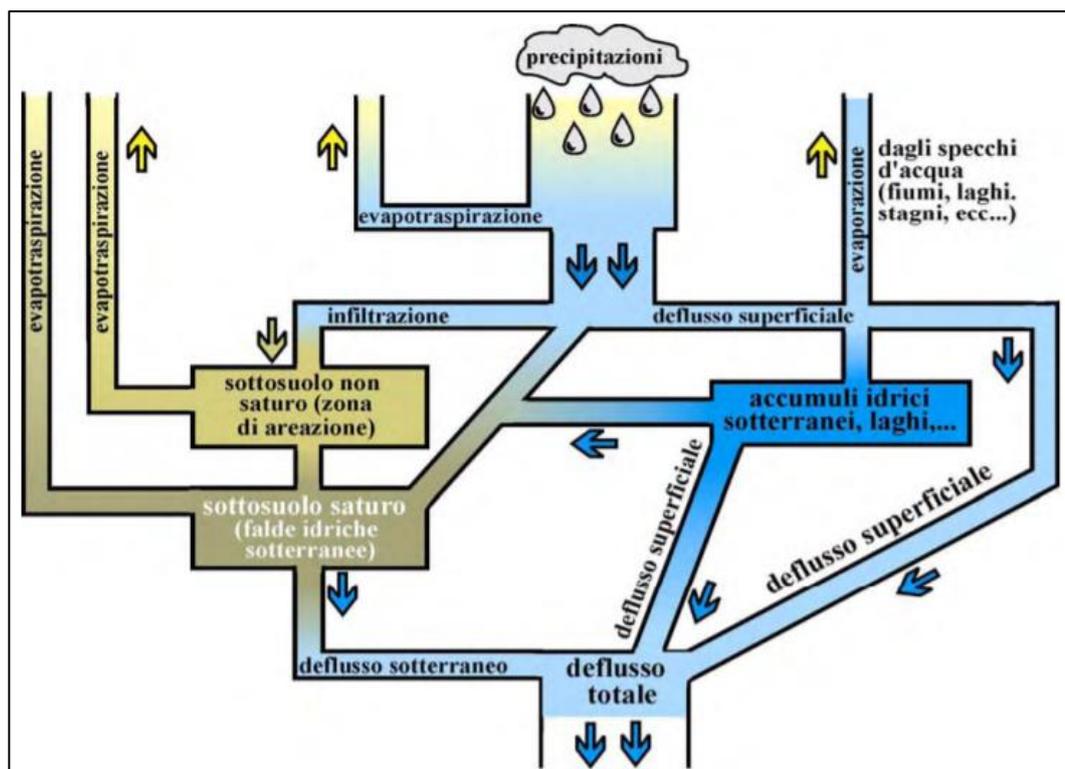


Figura 5: Schema illustrante le modalità di formazione dei deflussi totali (Forneris G., Pascale M., Perosino G.C., Zaccara P., 2008).

Nella figura 6 è illustrato un confronto tra una ipotetica situazione di un terreno naturale permeabile (immagine a sinistra) con scarso scorrimento superficiale, buona penetrazione in falda e forte evapotraspirazione, e fra una situazione caratterizzata da una superficie impermeabilizzata (immagine a destra) con elevato deflusso superficiale, scarsa o quasi nulla penetrazione nella falda e limitata evapotraspirazione. Sembrerebbe, quindi, che l'impermeabilizzazione del suolo sia significativamente responsabile degli eventi alluvionali. Tale affermazione è vera, ma è doveroso stabilire le quantità che entrano in gioco durante gli eventi idrometeorologici eccezionali.

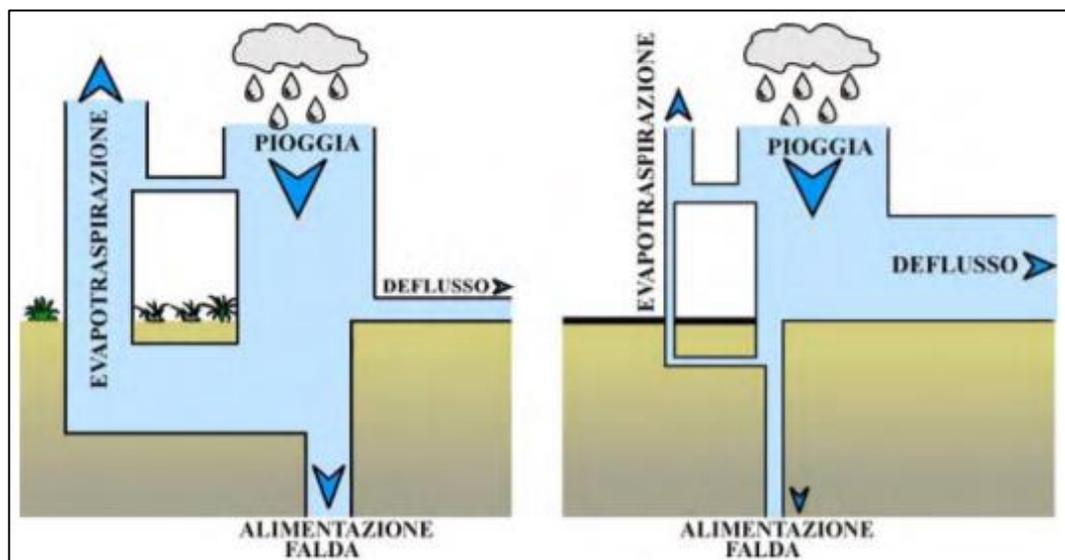


Figura 6: Confronto tra un suolo naturale permeabile (a sinistra) ed uno impermeabile (a destra) (Forneris G., Pascale M., Perosino G.C., Zaccara P., 2008).

In occasione degli eventi eccezionali, le piogge insistono per tempi più o meno lunghi. Durante le prime fasi il terreno tende ad assorbire l'acqua come una sorta di "spugna", fino a raggiungere la condizione di saturazione. Una volta raggiunta tale configurazione, se le precipitazioni continuano ad insistere, il suolo non è più in grado di trattenere altra acqua e, per cui, la superficie assume caratteristiche sempre più simili a quelle impermeabilizzate; quasi tutta l'acqua che precipita, allora, va ad alimentare i deflussi superficiali. Infine, non bisogna dimenticare che le superfici impermeabilizzate dal catrame e dal cemento – per

quanto estese come conseguenza dell'eccessiva antropizzazione del territorio – non costituiscono porzioni rilevanti dei bacini imbriferi.

Quindi, si può riassumere quanto segue:

- l'impermeabilizzazione del suolo è una questione importante, ma soprattutto per quanto riguarda le conseguenze negative sul ciclo dell'acqua, siccome influenza l'idrologia superficiale e le acque sotterranee, prevalentemente nelle situazioni di magra;
- un altro aspetto negativo è dato dalle conseguenze sui climi a livello strettamente locale (per esempio nelle aree fortemente urbanizzate);
- l'impermeabilizzazione del suolo, di sicuro, influenza i deflussi negli eventi idrometeorologici eccezionali, ma il contributo alla formazione delle più importanti portate di piena è relativamente modesto.

In conclusione, si tratta di una questione di tutela del suolo davvero importante per molte ragioni – tra cui quelle inerenti agli eventi di piena – ma occorre stare attenti a non sopravvalutare il fenomeno o designarlo come causa prevalente.

1.3 I modelli di trasformazione afflussi-deflussi

Con la dicitura "trasformazione afflussi-deflussi" si fa riferimento all'insieme di tutti quei processi idrologici che concorrono alla formazione del deflusso, a partire dalla precipitazione meteorica e prima ancora che il deflusso stesso si incanali nella rete idrografica.

La risposta idrologica di un bacino è il frutto di processi climatici, ecologici e idrologici. Ognuno di questi processi deve essere valutato e modellato a opportuna scala spaziale e temporale. Pertanto, il fenomeno è influenzato da numerosi fattori: le caratteristiche del terreno, le condizioni di umidità del suolo all'inizio dell'evento, le modalità con cui evolve l'evento meteorico.

I principali fenomeni che determinano la risposta idrologica di un bacino sono i seguenti:

- il deflusso è generato da ciascuna area contribuente di un bacino come risultato delle interazioni dinamiche tra le precipitazioni e l'umidità del suolo;
- il deflusso globale è dato dal contributo delle varie componenti di deflusso;
- i flussi di acqua sono incanalati all'interno della rete, come previsto dalla topologia della rete stessa.

I modelli di formazione dei deflussi hanno l'intento di fornire una descrizione matematica, più o meno dettagliata, dei processi idrologici che si svolgono nel bacino idrografico. Data la complessità dei fenomeni e delle relazioni che influenzano e descrivono il reale comportamento di un bacino, si introduce un modello idrologico che ne approssima il comportamento reale attraverso alcune semplificazioni. In relazione alla loro struttura i modelli idrologici di trasformazione afflussi-deflussi possono essere classificati in:

- Modelli idraulici: basati prevalentemente su leggi empiriche. Sulla base di osservazioni sperimentali e di modelli analitici tentano di simulare i singoli processi idrologici che vengono poi collegati da opportune relazioni matematiche. Questi modelli offrono una parametrizzazione meno onerosa e soprattutto più facilmente determinabile da un'informazione qualitativa sulla litologia e sull'uso del suolo del bacino.
- Modelli concettuali: derivati da opportune schematizzazioni della reale dinamica dei fenomeni. Essi assimilano la trasformazione reale delle piogge in portate così da fornire una risposta simile. In questa categoria è possibile inquadrare modelli aventi strutture anche molto differenti: si possono identificare sia modelli molto articolati, simili a modelli idraulici, sia modelli come quelli lineari parametrici, di struttura semplice, vicina a quella dei modelli sintetici.
- Modelli sintetici (o a scatola chiusa o empirici): sono particolari modelli che non si prefiggono di riprodurre i processi idrologici e i fenomeni fisici che

intervengono nella trasformazione afflussi-deflussi né fisicamente né matematicamente. Essi considerano il sistema come una scatola chiusa (*black box*) sulla quale non viene fatta alcuna ipotesi. La modellazione, perciò, si conclude nella ricerca di un operatore matematico che leghi tra loro, nel miglior modo possibile, ingresso ed uscita del sistema, ovvero l'afflusso meteorico con la portata che defluisce alla sezione di chiusura del bacino idrografico.

Al fine di determinare le portate che defluiscono alla sezione di chiusura del bacino idrografico è necessario conoscere la quantità di acqua che precipita sul suolo. Difatti, essa contribuisce con diverse modalità e con diversi tempi alla formazione delle portate. Se durante una precipitazione piovosa la quantità d'acqua caduta sulla superficie di un bacino idrografico risulti maggiore di quella che, contemporaneamente, ritorna all'atmosfera per evapotraspirazione, allora nella rete idrografica si ha un incremento del livello idrico.

I quattro meccanismi distinti che danno luogo al deflusso sono: afflusso diretto, deflusso superficiale, deflusso profondo e deflusso ipodermico.

L'afflusso diretto rappresenta l'aliquota del volume di pioggia che precipita direttamente sulle superfici liquide del bacino. E, siccome tale contributo risulta essere molto limitato, la portata relativa a tale contributo viene assimilata a quella relativa al deflusso superficiale.

Il deflusso superficiale, salvo il caso di bacini molto permeabili, rappresenta il contributo maggiore del deflusso complessivo; esso comincia a formarsi dopo un certo lasso di tempo dall'inizio dell'evento piovoso, in particolare, quando l'intensità di pioggia supera l'intensità di evapotraspirazione e di infiltrazione. Altri fattori che determinano il ritardo della formazione della portata sono: i caratteri geomorfologici del bacino idrografico (la dimensione del bacino, la natura geologica dei terreni, la destinazione d'uso e l'urbanizzazione dei suoli, la pendenza dei versanti, l'estensione e la struttura della rete idrografica, la tipologia e la consistenza della vegetazione, ecc.) e l'iniziale stato d'imbibizione del bacino.

Il deflusso profondo rappresenta l'aliquota dell'acqua che si infiltra nel sottosuolo. Bisogna, però, considerare che il moto delle acque filtranti avviene in modo molto lento, per cui il deflusso sotterraneo diventa portata con un forte ritardo rispetto all'inizio del fenomeno meteorico. Se si considerano periodi di tempo molto lunghi, infatti, si può notare che il deflusso profondo costituisce il principale contributo alla formazione del deflusso complessivo. Inoltre, il contributo di portata del deflusso profondo risulta essere molto più regolare rispetto a quello del deflusso superficiale a causa dell'azione modulatrice che gli ammassi filtranti attraversati esercitano sulla portata del deflusso profondo.

Il deflusso ipodermico rappresenta la parte dell'acqua di pioggia infiltratasi nel terreno che scorre, più o meno parallelamente, alla superficie del suolo in uno strato superficiale spesso alcune decine di centimetri. L'entità di tale tipo di deflusso dipende dalle caratteristiche litologiche del bacino; risulta essere essenzialmente nullo quando il terreno è impermeabile e, in tal caso, non può esservi infiltrazione. Invece, quando il terreno è permeabile in profondità l'infiltrazione forma solo il deflusso profondo. Solitamente, il contributo del deflusso ipodermico viene accorpato con le portate dovute ai deflussi superficiali. Tale accorpamento è dovuto principalmente a tre fattori:

- la costante di tempo di tale fenomeno risulta essere più vicina a quella tipica del deflusso superficiale rispetto a quella del deflusso profondo;
- è complicato determinare con sufficiente approssimazione tale contributo;
- alcune ricerche condotte negli Stati Uniti hanno dimostrato che il contributo del deflusso ipodermico è rilevante solo in piene di piccola entità mentre nel caso di piene di grossa rilevanza esso risulta essere trascurabile.

La quantità di acqua di pioggia che si infiltra nel terreno dipende dalle condizioni iniziali della superficie, dalle caratteristiche idrologiche del primo strato di suolo e dal suo contenuto idrico. L'acqua che non può essere assorbita dal terreno si accumula in pozzanghere formate dalla scabrezza della superficie che quando si riempiono provocano ruscellamento superficiale. A seconda del contenuto idrico, lo strato di suolo può assorbire l'acqua o trasferirla allo strato sottostante. In

presenza di una falda superficiale, inoltre, può esserci un apporto di acqua agli strati più profondi per effetto della risalita capillare.

La determinazione dei deflussi causati dagli afflussi meteorici al bacino idrografico considerato costituisce uno dei problemi centrali dell'idrologia. Per determinare il bilancio idrico di un suolo è necessario prendere in considerazione tutti gli apporti e le perdite d'acqua lungo il profilo verticale di suolo. Considerando lo schema riportato nella figura 7 come rappresentativo del bilancio idrologico di massa dell'acqua per una porzione elementare di un bacino idrografico, esso ha come ingresso fondamentale la precipitazione misurata in prossimità del suolo.

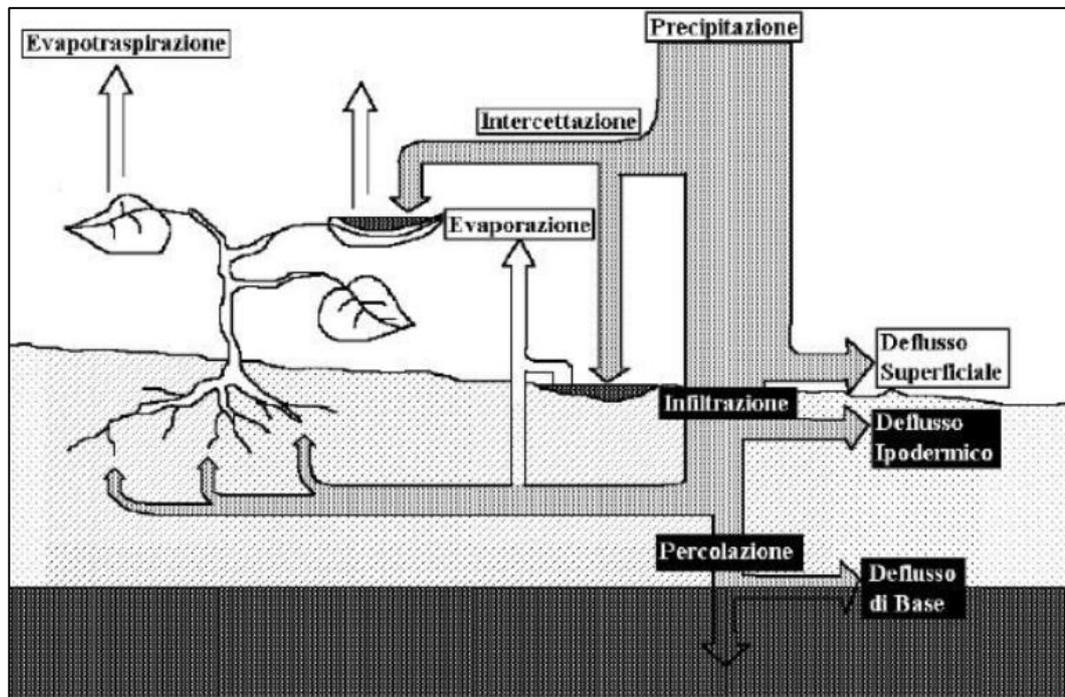


Figura 7: Schema del bilancio idrologico per una porzione elementare di un bacino idrografico (Giugni M., 2018).

La precipitazione viene: in parte intercettata dalla vegetazione, in parte si infila nel sottosuolo e, in parte ancora va ad accumularsi in piccoli invasi naturali e/o artificiali (pozzanghere, avvallamenti del terreno, impluvi artificiali); la parte rimanente, infine, dà luogo al deflusso superficiale che scorrerà in direzione della rete idrografica secondo le linee di massima pendenza del terreno.

La presenza di una coltura o di vegetazione spontanea causa delle perdite d'acqua nel suolo radicato per traspirazione e contemporaneamente diminuisce le perdite per evaporazione negli strati superficiali occultando la superficie del terreno. A seconda della tipologia di suolo, del suo contenuto idrico e della fase fenologica della coltura, l'acqua nel suolo è più o meno disponibile per la pianta, influenzando quindi la sua capacità traspirativa.

Il sistema suolo – vegetazione – quindi, rappresenta una naturale capacità di invaso che tende a ridurre la quantità di acqua precipitata, quale raggiungerà la rete idrografica denominata precipitazione efficace. Questa decurtazione dipenderà, in ogni istante, dalla capienza complessiva di tali invasi e che varierà nel tempo sia a causa del loro graduale riempimento durante prolungati eventi di pioggia, sia a causa di altri processi di trasferimento dell'acqua che agiscono nella configurazione suolo - atmosfera.

I diversi tipi di deflusso (superficiale, ipodermico e profondo) assumono una importanza relativa, che varia in funzione del tempo di risposta del bacino in esame. Per tempo di risposta del bacino s'intende l'intervallo di tempo trascorso fra l'inizio dell'evento meteorico e l'arrivo del colmo di piena alla sezione di chiusura. Questo dipende, in maniera sensibile, dall'estensione del bacino stesso e dalla lunghezza del corso d'acqua principale, nonché dal regime di quest'ultimo (torrentizio, fluviale, ecc.).

Quindi, avendo come fine principale la stima dei deflussi superficiali ed eventualmente ipodermici, la modellazione della trasformazione afflussi - deflussi si basa essenzialmente sul calcolo, a partire dalla distribuzione spazio-temporale delle piogge e delle perdite che queste subiscono per intercettazione e infiltrazione.

Le piante poi, attraverso le radici, assorbono l'acqua dal suolo e la trasmettono sotto forma liquida agli apparati fogliari. Dal mesofillo fogliare l'acqua liquida passa allo stato di vapore ed è allontanata dalla superficie sulla quale è avvenuto il passaggio di stato. Questo fenomeno viene indicato con il termine di traspirazione. Essa è funzione dell'apporto di energia, del gradiente verticale della tensione di vapore e della velocità del vento. L'evaporazione, che avviene in modo

analogo, è il processo attraverso il quale l'acqua liquida passa allo stato di vapore ed è allontanata dalla superficie sulla quale è avvenuto il passaggio di stato.

L'energia necessaria al passaggio di stato è fornita, per la maggior parte, dalla radiazione solare con un contributo derivante dalla temperatura dell'aria circostante. Il tasso di evaporazione è legato alla differenza fra la tensione di vapore sulla superficie di evaporazione (vale a dire la tensione di saturazione) e quella dell'atmosfera circostante. Man mano che il fenomeno dell'evaporazione procede, l'aria circostante diventa gradualmente satura fino a che, nel caso in cui l'aria satura non venga allontanata dalla superficie di evaporazione per azione del vento, il processo si arresta. La radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità e la velocità del vento rappresentano, pertanto, i parametri climatici fondamentali nel processo dell'evaporazione.

I fenomeni dell'evaporazione e della traspirazione avvengono simultaneamente e difficilmente possono essere distinti, perciò, si parla di evapotraspirazione. La stima dell'evapotraspirazione influenza solo indirettamente la stima delle perdite legate alle piogge, tramite il bilancio di umidità del suolo da cui dipende il tasso di infiltrazione, e il bilancio d'acqua dei piccoli invasi da cui dipende l'intercettazione. Il fattore di perdita, quantitativamente più rilevante è nella maggior parte dei casi legato al processo d'infiltrazione.

La modellazione del processo di trasformazione degli afflussi in deflussi si inserisce come componente fondamentale nella più generale modellistica per la ricostruzione e/o la previsione degli idrogrammi di piena, a partire dalla distribuzione spazio - temporale delle piogge che interessano il bacino. La trasformazione della pioggia al suolo in portata nella sezione di chiusura, si verifica secondo una cascata di processi, ognuno dei quali si può rappresentare attraverso un idoneo sotto-modello specializzato. In particolare, l'ingresso principale al modello sarà costituito da una serie di misurazioni di pioggia, di tipo puntuale (registrazioni pluviometriche) e/o distribuito (radar meteorologico), che dovranno essere interpolate, tramite un adeguato modello estimativo per ottenere l'andamento delle precipitazioni lorde al suolo nello spazio e nel tempo in termini di afflussi per unità di area (ovvero con dimensioni di portata per unità di area).

La porzione di tali precipitazioni che andrà a formare lo scorrimento superficiale (ed eventualmente anche il deflusso ipodermico, nei limiti precedentemente accennati), detta anche precipitazione efficace o deflusso efficace, verrà stimata con un adeguato modello di trasformazione afflussi - deflussi, che stimerà la produzione di deflusso teoricamente in ciascun punto del bacino, avente questa ancora le dimensioni di una portata per unità di area.

Infine, il processo di raccoglimento dei deflussi superficiali nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo, fino alla sezione di chiusura, verrà riprodotto attraverso un opportuno modello di formazione dell'onda di piena.

A causa dell'urbanizzazione si riscontra l'aumento del volume di deflusso diretto e un aumento della portata massima dovuti:

- all'aumento delle superfici impermeabili (strade, parcheggi, tetti, ecc.) riduce complessivamente l'infiltrazione;
- alla trasformazione dei canali naturali in canali sotterranei riduce i volumi di invaso. La rete artificiale è idraulicamente più efficiente.

Come conseguenza la velocità del deflusso aumenta e la concentrazione è più rapida incrementando i picchi di piena. Dopo l'urbanizzazione il picco di piena aumenta ed è anticipato, (figura 8). Nonostante l'aumento del volume di deflusso diretto, la piena si esaurisce più rapidamente.

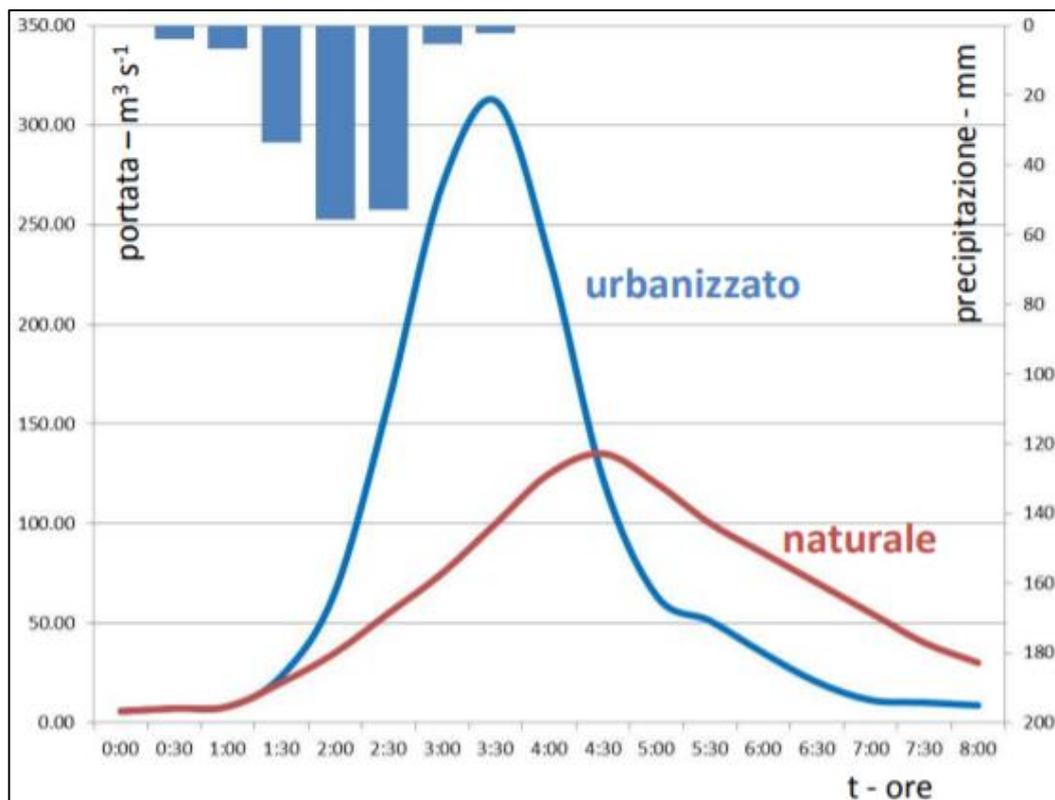


Figura 8: Differenza del picco di piena tra un suolo urbanizzato (linea blu) e uno naturale (linea rossa) (Dalla Fontana G.C., 2013).

1.4 Sistemi di drenaggio urbano

Per sistema di drenaggio urbano si fa riferimento all'insieme integrato di opere, tipiche dell'ingegneria idraulica, realizzate al fine di raccogliere, convogliare e allontanare dalle zone urbanizzate le acque bianche/meteoriche di dilavamento e le cosiddette acque nere/reflue di origine civile e produttiva, per poi reintrodurle nell'ambiente in seguito ad eventuali trattamenti di depurazione.

In una definizione generale, le acque nere, sono quelle acque catalogate come nocive per la salute pubblica o moleste per il pubblico. Tra le fonti di produzione delle acque nere in un complesso urbano si trovano soprattutto le abitazioni e i luoghi di riunione abituali, come le scuole e gli ospedali, il luogo di lavoro e altri edifici di pubblica utilità. Inoltre, vi sono ulteriori fonti di produzione presenti nel tessuto cittadino: piccole botteghe artigiane, officine meccaniche, lavanderie, laboratori chimici e di analisi, macelli; quali contribuiscono con scarichi

di particolare natura e, alle volte, con un elevatissimo tasso inquinante. La normativa vigente in materia prevede che tutti gli agglomerati urbani con un numero di abitanti equivalenti e/o superiore a 2000 di essi, devono essere dotati di reti fognarie per lo smaltimento delle acque reflue urbane.

Tutte le acque non riconosciute come nocive per la salute o moleste per il pubblico sono classificate secondo la dicitura “acque bianche”. Tra queste ci sono:

- le acque meteoriche di dilavamento provenienti da tutte le aree aperte impermeabilizzate quali strade, parcheggi, tetti, cortili, ecc.;
- le acque utilizzate per il lavaggio delle strade;
- le acque di raffreddamento provenienti da attività industriali.

1.4.1 Cenni storici

Le prime testimonianze storiche di fognature risalgono a un periodo compreso tra il 2500 e il 2000 a.C. circa e le prime di esse sono state ritrovate nella zona attuale del Pakistan. Dai resti fognari si è potuto ricostruire la fisionomia della città che, al di sotto del livello stradale, presentava una vasta rete di canali di mattoni in grado di convogliare le acque reflue provenienti dalle abitazioni.

Le fognature antiche più efficienti, però, furono quelle dell'impero Romano. Infatti, alla fine del VII secolo a.C., sotto il regno di Tarquinio Prisco, venne realizzata la “*Cloaca Massima*”, ovvero una delle più antiche condotte fognarie. Il nome latino *Cloaca Maxima* significa letteralmente "la fogna più grande". Essa fu una delle prime grandi opere di urbanizzazione progettata per bonificare gli acquitrini che occupavano le vallate alla base dei colli dell'Urbe, nonché per far defluire verso il Tevere i liquami del Foro Romano, del Foro Boario e di Campo Marzio.



Figura 9: Lo sbocco nel fiume Tevere nella Cloaca Massima (Wikipedia, 2005).

La Cloaca Massima usufruiva dell'esperienza sviluppata dall'ingegneria etrusca, con l'utilizzo dell'arco a volta che la rendeva più stabile e duratura nel tempo. Aveva origine nella Suburra e attraverso l'Argiletto, il Foro, il Velabro, il Foro Boario, si scaricava all'interno del Tevere nei pressi di Ponte Emilio.

Con la cloaca massima i romani hanno tramandato uno dei più importanti esempi di ingegneria idraulico-sanitaria e, con molta probabilità, la più antica fogna ancora funzionante al mondo da oltre 2000 anni.

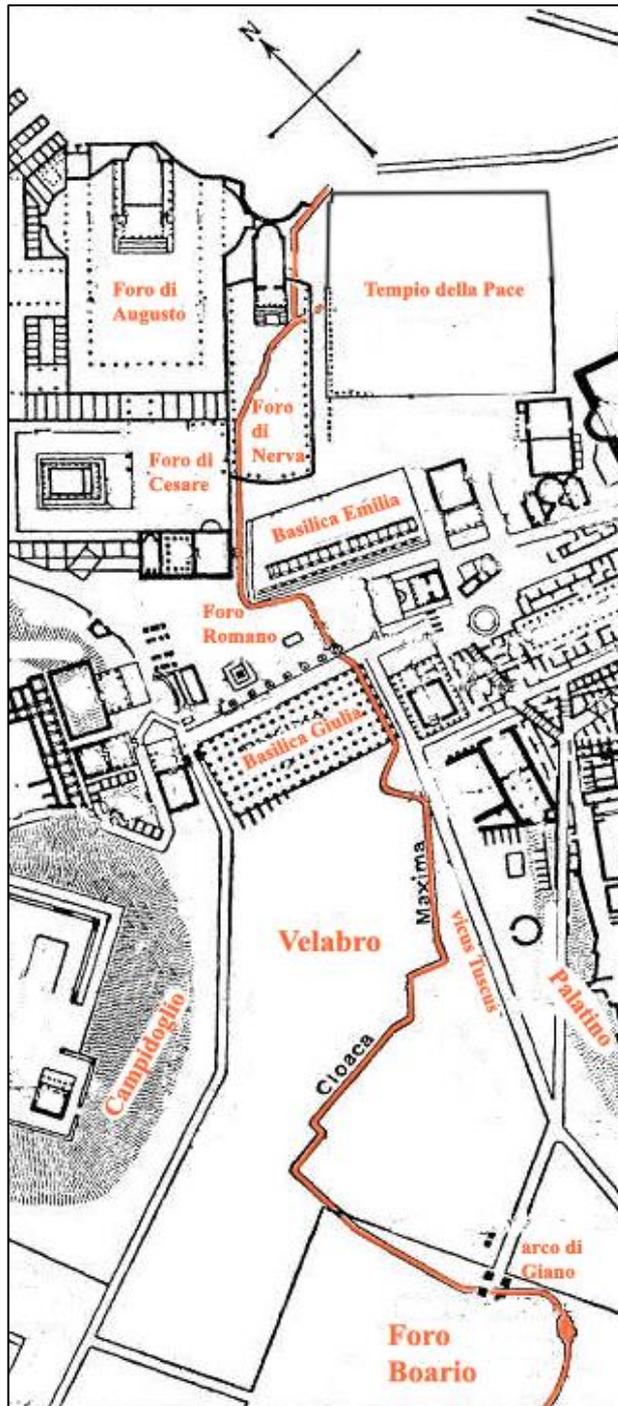


Figura 10: Percorso della Cloaca Massima, Roma (Wikipedia, 2005).

A seguito della caduta dell'impero romano non vennero più costruite nuove fognature e quelle esistenti furono abbandonate. Solo nel XVII secolo, a seguito

della forte urbanizzazione di città come Parigi o Londra, si ebbe nuovamente l'esigenza di costruire delle reti fognarie.

Fino all'inizio degli anni '70 le acque all'interno della rete fognaria venivano esclusivamente raccolte, trasportate e scaricate senza subire alcun trattamento. In seguito, invece, questa visione di fognatura è stata sostituita dal più moderno concetto di sistema di drenaggio.

I sistemi di drenaggio urbano, oltre a convogliare e trasportare l'acqua, si occupano di limitare l'impatto ambientale sui corpi idrici ricettori, principalmente, per problemi legati alla qualità e alla quantità delle acque.

1.4.2 Impianti di fognatura

A seconda del reflujo di provenienza il sistema fognario si distingue in:

- *fognature urbane;*
- *fognature industriali.*

I sistemi fognari urbani si distinguono, a loro volta, in:

- *misto o unitario:* vale a dire che, sia le acque reflue urbane e sia quelle meteoriche sono raccolte e trasportate in un'unica rete. È un approccio molto pratico, ma non certo economico, in quanto si trasmettono all'impianto di depurazione elevati volumi d'acqua e ciò comporta un aumento dei costi di smaltimento. Inoltre, ne può conseguire una scarsa efficienza da parte del sistema di depurazione nel trattare notevoli quantità d'acqua. In questi sistemi, i collettori sono dimensionati in funzione delle portate meteoriche conseguenti all'evento di pioggia di progetto, le quali sono centinaia di volte più grandi delle portate nere.

Dal momento che, l'impianto di depurazione è dimensionato con valore di poco superiore alla portata nera, in caso di piogge le acque miste che vanno in surplus dovranno essere scaricate direttamente nel mezzo recettore

attraverso opportuni manufatti definiti: scaricatori di piena. Essi sono costruiti solo nelle fognature a sistema misto quando la fogna è in prossimità il mare, un fiume o un altro corpo ricevente. L'ubicazione di questi dispositivi è consigliabile, ogni qual volta sia possibile, con lo scarico diretto nel recettore (scarichi di alleggerimento) e, comunque, all'ingresso del depuratore. Nei sistemi misti il lavaggio della fognatura è legato al regime pluviometrico, pertanto, nei periodi di siccità l'esigua portata nera defluisce a velocità molto bassa con conseguente sedimentazione dei solidi e l'innescio di fenomeni putrefattivi.

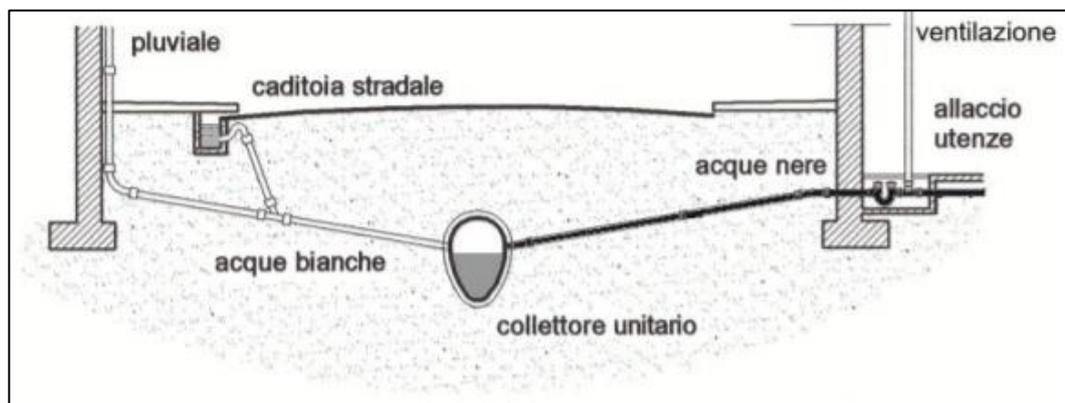


Figura 11: Schematizzazione di una fognatura con sistema misto/unitario (Università degli Studi dell'Aquila, 2018).

- *separato*: ovvero, che utilizza due reti separate. Una rete serve per le acque nere, mentre l'altra è usata per le acque pluviali. Ciò permette di risolvere il problema degli elevati volumi d'acqua trasferiti all'impianto di depurazione, ma comporta dei costi di messa in opera e dei materiali maggiore. La dimensione dei collettori delle acque meteoriche è praticamente identico a quello della corrispondente rete mista, mentre la rete nera è caratterizzata da spechi di modeste dimensioni. Il sistema separato garantisce una portata nera pressoché costante all'impianto di depurazione, però, data la limitata quantità, può creare problemi di smaltimento della parte solida e soprattutto nei tratti pianeggianti, dovuto alla mancanza del lavaggio operato della portata pluviale.

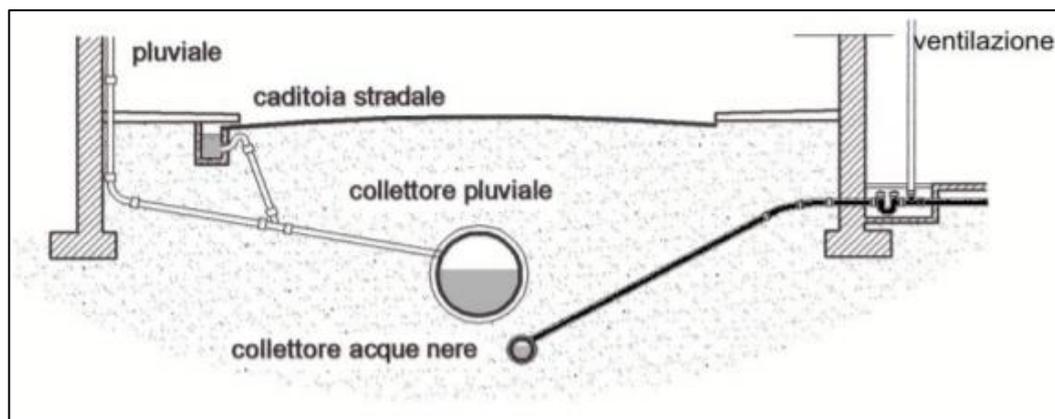


Figura 12: Schematizzazione di una fognatura con sistema separato (Università degli Studi dell'Aquila, 2018).

Dal punto di vista igienico-sanitario entrambi i sistemi hanno un limite: non consentire il completo conferimento del carico inquinante raccolto dalla fognatura all'impianto finale di trattamento.

Infatti, nel sistema separato e privo di separatori di prima pioggia, le acque di lavaggio delle strade sono scaricate dai collettori pluviali senza trattamento nei recettori, mentre, nel sistema misto durante eventi di pioggia poco rilevanti, che attivano gli scaricatori di piena con gradi di diluizione poco superiori alla norma, una parte del carico inquinante connesso alle portate nere è sversato direttamente nel recettore senza trattamento.

Infine, constatato che l'inquinamento delle acque di prima pioggia è causato principalmente dal dilavamento delle superfici stradali pavimentate, nella realizzazione di nuove reti di fognatura per entrambi i sistemi, si tende a isolare, a monte dell'immissione nella rete, le acque di pioggia intercettate e raccolte dai tetti e convogliarle verso il recettore più vicino, su terreni permeabili o direttamente nella falda.

Naturalmente una rete fognaria, a seconda che sia di tipo mista o separata, richiede un approccio progettuale differente. Infatti, se nel primo caso occorre tenere conto sia delle acque reflue che di quelle meteoriche, nel caso di fognature separate questi due aspetti vanno considerati singolarmente. Difatti, la *rete fognaria*

delle acque nere è adibita, esclusivamente, alla raccolta ed al convogliamento delle acque reflue urbane unitamente alle eventuali acque di prima pioggia, mentre la *rete fognaria delle acque bianche* è adibita solamente alla raccolta e al convogliamento delle sole acque meteoriche di dilavamento e di lavaggio delle strade, e può essere dotata o meno di dispositivi per la raccolta e la separazione delle acque di prima pioggia.

Nelle fogne bianche di nuova costruzione è richiesto, dall'autorità competente, che le acque di prima pioggia debbano essere sottoposte, prima del loro smaltimento, a un trattamento di grigliatura e dissabbiatura per evitare fenomeni di abrasione alle condotte. Infatti, le portate di prima pioggia, soprattutto dopo un lungo periodo di siccità, presentano elevati contenuti inquinanti a seguito del lavaggio delle superfici stradali. In casi particolari, quali acque di dilavamento di piazzali, strade, parcheggi e altro ancora, può essere anche richiesto un trattamento di disoleazione. Si possono, pertanto, trovare pure centri abitati serviti in parte con un sistema misto ed in parte con un sistema separato.

A seguito dell'entrata in vigore del Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri del 4 marzo 1996, nelle zone di nuova urbanizzazione e nei rifacimenti di quelle preesistenti si deve, di norma e salvo ragioni economiche ed ambientali contrarie, prevedere il sistema separato. In tali zone si può considerare il solo invio delle acque di prima pioggia nella rete nera soltanto se tale immissione è compatibile con il sistema di depurazione adottato.

Gli impianti fognari sono suddivisi, in funzione del ruolo che svolgono, nelle seguenti sezioni:

- *rete di raccolta*, ossia le opere che intercettano e convogliano le acque provenienti dalle aree servite, come caditoie stradali, pozzetti e manufatti di scarico;
- *impianti di trasporto*, opere che costituiscono l'ossatura principale della rete in quanto trasportano l'acqua agli impianti di depurazione e al recapito finale, o al loro riuso (collettori e pozzetti);

- *impianti di depurazione*, insieme delle opere adottate per il trattamento delle acque e per conferire loro caratteristiche compatibili con quelle del corpo ricettore.

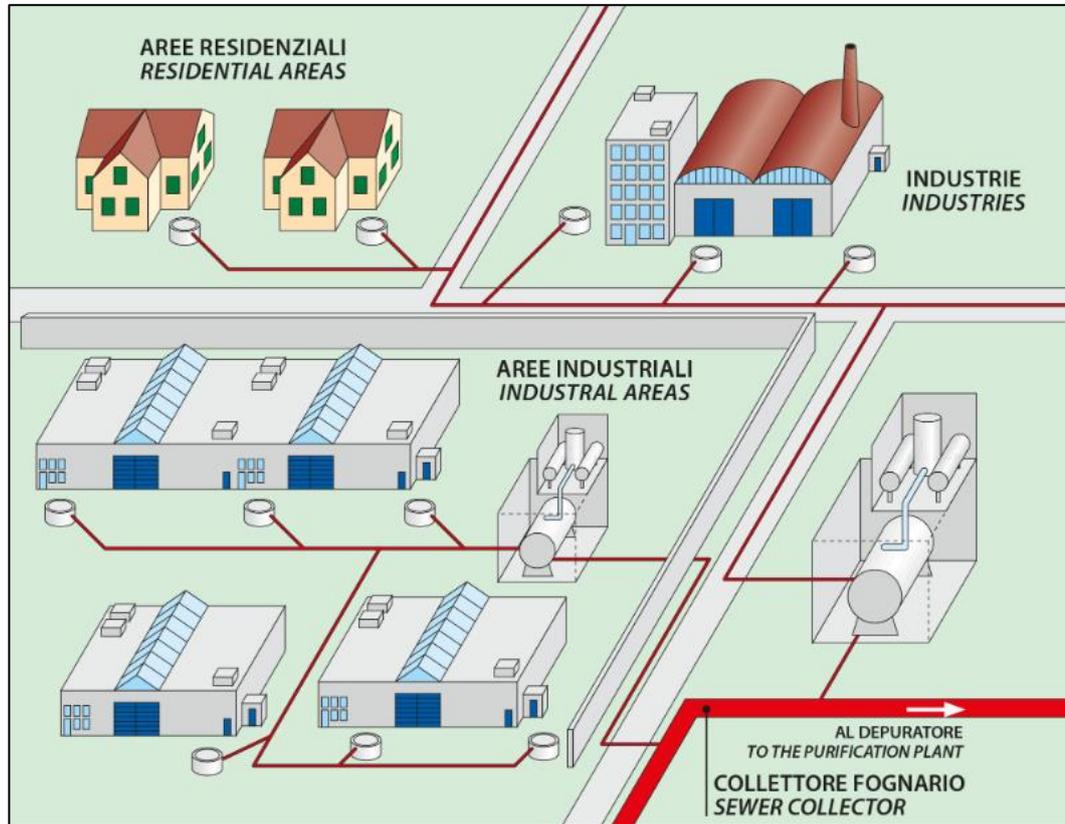


Figura 13: Schematizzazione di una rete fognaria (EMS Water Technology).

1.4.3 La geometria delle sezioni degli spechi di fognatura

Per ragioni igieniche gli spechi di fognatura sono realizzati a sezione chiusa e con forme geometriche caratteristiche e differenziate in funzione della tipologia di rete, al fine di permettere un regolare flusso con portate sia basse che alte. Tra le sezioni interne dei condotti di fognatura, le più comuni sono:

- *circolare*: usata principalmente per fognature unitarie e nere di dimensione compresa da un minimo di 250 mm ad un massimo di 800 mm e nelle fognature meteoriche con diametri oltre i 1000 mm. In caso di collettori a servizio di grandi bacini e per i quali è previsto il vettoriamento di portate

elevate, si ricorre all'adozione di più specchi a sezione circolare funzionanti in parallelo;

- *ovoidale nuovo inglese o ovale accentuato*: è utilizzata principalmente per fogne miste poiché, presentando per le portate minime la massima velocità, è adatta a convogliare acque unitarie con scarsa percentuale di acque nere. Si adottano specchi ovoidali fino alla dimensione 1600x2400 mm;
- *ovoidale vecchio inglese*: come per la precedente ma idonea per acque miste con maggiore percentuale di acque nere;
- *policentrica con cunetta circolare*: il ricorso all'adozione di sezioni policentriche ovoidali sia per le acque nere di sistemi separati o misti è dettato da necessità idrauliche. Le portate nere, di limitata entità se raffrontate alle portate bianche prodotte dalla stessa area servita, debbono essere vettorate con velocità sostenuta sia per ridurre i tempi di permanenza del liquame in fognatura, sia per ostacolare fenomeni di sedimentazione delle sostanze organiche ed inorganiche presenti nei reflui.
- *policentrica allargata*: essendo dotate di una cunetta ricavata sul fondo della platea (savanella) sono adatte per collettori che devono condurre tutte le acque nere continue.

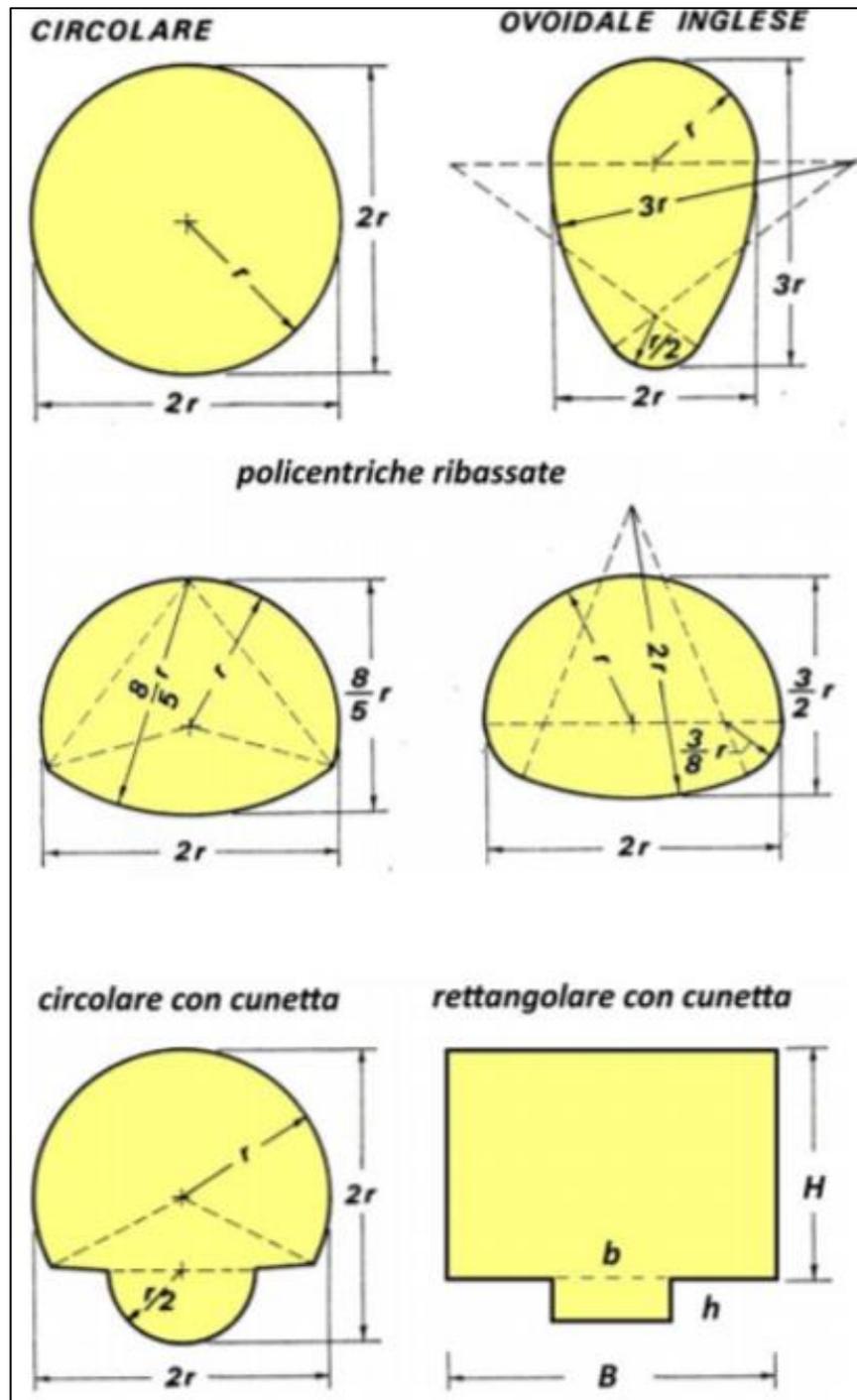


Figura 14: Sezioni correnti per specchi di fognatura (Università degli Studi dell'Aquila, 2018).

1.4.4 Materiali costituenti i collettori

In Italia, attualmente, non esistono leggi o regolamenti in merito alla conservazione delle reti di fognatura nei riguardi delle interazioni chimico-fisiche tra materiali ed ambiente di posa. Comunque, l'argomento è della massima rilevanza, poiché è correlato alla durata nel tempo dell'efficienza delle opere.

La principale caratteristica delle tubazioni per fognatura è quella di avere una buona resistenza nei confronti delle azioni di tipo fisico, meccanico, chimico e biologico, dovute alle acque reflue e meteoriche. La protezione interna è assicurata dal materiale costituente il tubo oppure da particolari rivestimenti interni che, a seconda dei casi, lo rendono più o meno idoneo alle reali condizioni di utilizzo. Le tubazioni realizzate con differenti materiali hanno un proprio campo di applicazione, in funzione delle:

- tensioni di esercizio;
- sollecitazioni dinamiche (traffico) o accidentali (sovrappressioni di moto vario);
- resistenza alla corrosione e all'abrasione;
- resistenza all'aggressività.

Sul mercato esiste un'ampia gamma di prodotti che a seconda del materiale possono essere classificati in tipo di tubazioni:

- *Metalliche*: acciaio e ghisa sferoidale; queste tubazioni vanno incontro a fenomeni di corrosione elettrochimica. Il fenomeno può essere generato sia dalla naturale formazione di pile galvaniche dovute all'eterogeneità del contatto suolo metallo, e sia dalla presenza nel suolo di correnti vaganti disperse da sistemi funzionanti a corrente continua. A causa della loro sensibilità ai reflui, vengono opportunamente rivestite internamente così da renderle più resistenti; nelle fognature urbane le tubazioni metalliche sono utilizzate molto raramente. Le tubazioni in acciaio possono trovare un utilizzo pratico e conveniente solo nel caso di impianti di sollevamento, mentre quelle in ghisa sferoidale recentemente vengono utilizzate anche per

la realizzazione di semplici rami di fognatura, ma la barriera da superare per il loro sviluppo è quella dei costi.

- *Lapidee*: calcestruzzo armato, sia ordinario che precompresso, e cemento-amianto; il calcestruzzo ed il cemento-amianto, se ben lavorati, normalmente non destano preoccupazioni per l'interazione con l'ambiente di posa. Fino all'inizio degli anni novanta erano molto utilizzate le tubazioni in cemento-amianto, fino alla loro messa al bando, a partire dal 1992 per la pericolosità delle fibre di amianto, in quanto cancerogene. Attualmente stanno prendendo piede delle altre tubazioni in fibrocemento ecologico, che utilizzano fibre di diversa natura, in sostituzione di quelle in amianto. I manufatti ottenuti con questa matrice cementizia hanno una notevole resistenza a trazione, alla corrosione, alla temperatura e all'usura, insieme a una notevole leggerezza. Le tubazioni in calcestruzzo armato normale e precompresso vengono utilizzate, sempre più raramente, per la realizzazione delle fognature. Infatti queste presentano tutti i difetti che denunciavano i cunicoli e i canali, utilizzati in passato, sia quelli in muratura che quelli in calcestruzzi intonacati internamente o meno. Esse sono facilmente aggredibili chimicamente dai liquidi trasportati, il che comporta corrosioni localizzate o diffuse nel tubo con ripercussioni gravi sull'ambiente a causa della possibile dispersione dei liquami nel terreno e nelle falde. Inoltre sono aggredibili anche dall'esterno per azione del terreno di sedime quando questo ha particolare composizione e proprietà. Sono inoltre soggetti ad essere scalfiti internamente a causa dei corpi abrasivi (sabbia, smerigli, ecc.) che nei reflui sono sempre presenti, per effetto di impropria immissione in fognatura di sostanze estranee o di acqua di provenienza meteorica ricadenti da tetti, terrazzi, cortili interni che non dovrebbero recapitare nella rete domestica.
- *Plastiche*: PVC (polivinilcloruro), PRFV (poliestere rinforzato con fibre di vetro) e PEAD (polietilene ad alta densità). I polimeri, matrice delle tubazioni di materiale plastico, per loro natura sono leggeri, facilmente

lavorabili, permettono di avere una lunghezza del tubo adeguata, hanno buone proprietà idrauliche, buona resistenza meccanica, resistenza agli attacchi chimici da parte dei liquidi trasportati e dei terreni di sedime – anche se la presenza di sostanze additivate può modificare tale comportamento. Il decadimento delle caratteristiche meccaniche delle tubazioni di materiale plastico è dovuto all'effetto provocato dal suo stesso peso e dai carichi insistenti. Inoltre, se esposto agli agenti atmosferici è soggetto a degrado dovuto all'invecchiamento e all'indebolimento delle caratteristiche meccaniche, con conseguente riduzione della resistenza.

- *Materiali cotti o ceramici*: le tubazioni realizzate in grès ceramico sono quelle più utilizzate. I pregi del grès sono caratterizzati da spiccata resistenza all'azione chimica dei liquami trasportati e dei terreni di posa. È di fatto un materiale immune all'azione abrasiva dei solidi trascinati dalla fase liquida, inoltre presenta un'ottima resistenza anche nei riguardi delle sostanze considerate critiche per i materiali legati. Presentano di contro una elevata fragilità ed una bassa resistenza meccanica a trazione e di conseguenza a flessione. Pertanto i singoli tubi hanno lunghezze limitate (normalmente 1 ÷ 1,5 m fino a 2 m per diametri fino a 600 mm) e pertanto richiedono un numero elevato di giunzioni.

1.4.5 Criteri di dimensionamento dei collettori

I collettori della rete di drenaggio urbana sono percorsi da correnti a superficie libera che richiedono una differenza di quota per permettere il normale deflusso dell'acqua. Quindi, l'andamento altimetrico del terreno diventa molto importante per garantire delle adeguate pendenze. Nella pratica si assume una pendenza minima dei collettori di almeno il 2%.

I parametri che più interessano per un corretto dimensionamento dei collettori sono il valore massimo e quello minimo delle portate Q . Inoltre, i principi

generali che regolamentano il corretto funzionamento del sistema fognario sono legati alla velocità dell'acqua nei collettori.

La pendenza della fognatura civile nelle abitazioni, considerando il valore relativo a tutti i condotti, dovrà altresì assicurare una velocità minima del flusso di 0,60 m/s, per garantire l'auto pulitura dei condotti fognari stessi.

Le velocità non devono essere troppo elevate, così da poter evitare l'usura per abrasione dei collettori a causa della presenza delle sabbie. Allo stesso tempo, non devono essere troppo piccole per evitare problemi di sedimentazione delle sostanze trasportate.

Per garantire i limiti di velocità è possibile intervenire modificando parametri come: la pendenza i , la scabrezza k_s e la dimensione dei diametri D dei collettori.

Ai fini del corretto drenaggio delle acque meteoriche, le reti fognarie – bianche o miste – devono essere progettate in modo da poter evitare che fenomeni di rigurgito interessino il piano stradale. Pertanto, è opportuno dimensionare i collettori affinché la portata massima da smaltire possa transitare, evitando che il sistema vada in pressione. I condotti non sono in grado di resistere a pressioni elevate, per cui un funzionamento in tali condizioni potrebbe danneggiarli, oltre ad aumentare il rischio di allagamenti soprattutto per la rete adibita al trasporto delle acque pluviali.

Si vuole, quindi, evitare che ci siano picchi di portata per i quali i collettori vadano in pressione. È consuetudine, perciò, considerare un grado di riempimento dei collettori:

$$\frac{y}{D} < 0,5 \div 0,7 \quad (1.1)$$

dove:

- y è il livello dell'acqua all'interno del collettore;
- D è il diametro del collettore.

Il piano stradale è collegato ai collettori mediante pozzetti sottostanti, e in presenza di portate eccessivamente elevate la piezometrica tenderà progressivamente a separarsi dall'andamento della condotta, fino a oltrepassare il piano campagna con conseguente risalita dell'acqua all'interno dei pozzetti e allagamento del piano stradale.

Per evitare che ci siano allagamenti a livello delle aree superficiali e che la rete di drenaggio vada in crisi, dunque, è opportuno conoscere le portate che affluiscono dalle superfici scolanti dei centri abitati e dei territori urbanizzati al sistema stesso.

Tramite la conoscenza delle precipitazioni avvenute è possibile risalire alle portate raccolte dalla rete tenendo, però, ben presente l'estensione, la natura e la composizione delle superfici scolanti per stabilire il reale deflusso.

Il continuo mutamento delle caratteristiche delle superfici scolanti nel tempo, causato dal fenomeno di antropizzazione, reca delle problematiche all'interno della rete fognaria legate sia alla quantità che alla qualità dell'acqua.

La bassa capacità delle aree urbanizzate di assorbire le acque di precipitazione comporta rilevanti aumenti nel volume, nelle velocità e nella portata del deflusso superficiale aggravando la problematica legata agli allagamenti.

Inoltre le piogge intense, in concomitanza al problema dell'impermeabilizzazione dei suoli dovuto all'urbanizzazione, provocano dei problemi notevoli alla rete di drenaggio, siccome la quantità d'acqua che la rete è in grado di far defluire risulta minore a quella che viene immessa in fognatura.

Lo sviluppo urbano determina delle problematiche relative non solo alla quantità delle acque da gestire, ma anche alla loro qualità. Le acque meteoriche dilavano le sostanze inquinanti accumulate sulla pavimentazione stradale e le canalizzano all'interno dei collettori.

Senza un opportuno trattamento di depurazione, le sostanze inquinanti convergono nei fiumi, nelle acque sotterranee e nei mari rappresentando un rischio per l'ambiente e la salute pubblica.

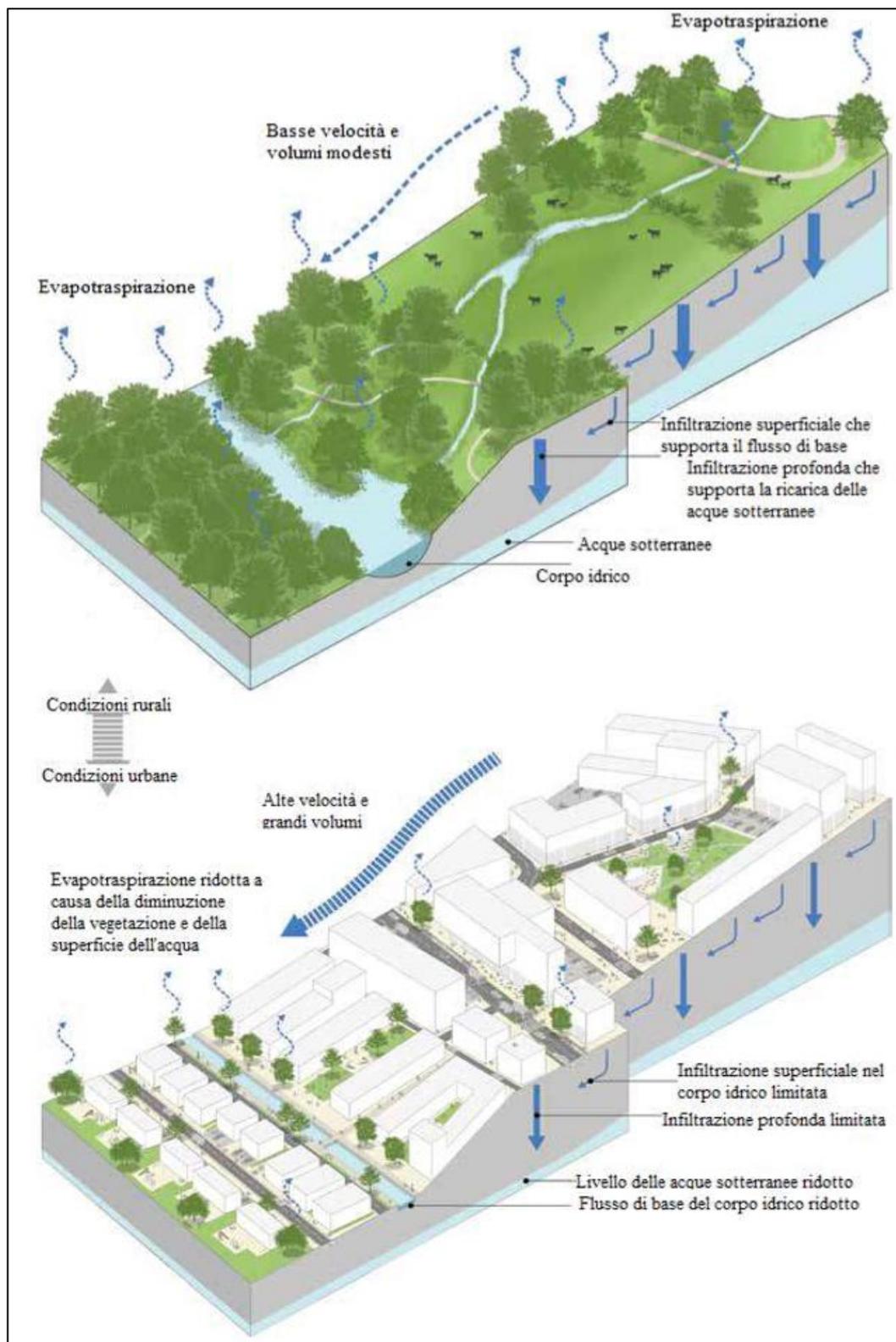


Figura 15: L'effetto dell'urbanizzazione su un'area rurale ed una urbana (Woods Ballard B., Wilson S., Udale-Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R., 2015).

Nei centri abitati di dimensioni medio-grandi e nelle aree interessate da frequenti allagamenti o da eventi meteorici di dimensioni eccezionali si sceglie, in via preferenziale, la soluzione a reti separate. Così facendo, si evita di sovradimensionare inutilmente la rete ordinaria durante il funzionamento per gli usi civili e si crea una rete dedicata per sopperire agli inconvenienti legati ad eventi meteorici gravosi per le città.

Nei sistemi separati delle fogne bianche i collettori sono dimensionati in base alle portate meteoriche massime, le quali risultano nettamente prevalenti rispetto a quelle reflue in occasione dei massimi eventi di progetto. Invece, nei sistemi separati delle fogne nere i collettori sono dimensionati in base alle portate nere minime perché interessati dalle sole acque nere, con frequenti problemi di velocità troppo esigua e conseguente possibilità di sedimentazione di solidi e innesco di processi anaerobici putrefattivi.

Ragion per cui, per i collettori misti si utilizzano sezioni diverse dalla circolare (es. sezioni policentriche oppure ovoidali) e così da garantire un'adeguata velocità/battente anche alla portata di tempo secco.

Come sottolineato precedentemente, per il dimensionamento della fogna bianca si fa riferimento alla massima portata pluviale che viene calcolata sulla base dello studio idrologico delle durate degli eventi meteorici, dell'estensione delle aree dei bacini scolanti e dei coefficienti di assorbimento dei terreni.

Tra i metodi più utilizzati per il calcolo della portata pluviale ci sono:

- il metodo dell'invaso lineare;
- il metodo della corrivazione.

I collettori pluviali, generalmente, sono dimensionati per bassi valori del tempo di ritorno ($T_R = 2 \div 10$ anni). Essendo T_R ben minore della vita utile dell'opera (pari a circa 40 anni), in pratica si accetta che i collettori risultino insufficienti durante alcune piogge eccezionali (di intensità superiore a quella di progetto) con conseguente fuoriuscita dai pozzetti di linea dell'acqua convogliata.

D'altra parte, per evitare le eventuali saltuarie esondazioni, occorrerebbe incrementare in misura economicamente inaccettabile il tempo di ritorno T_R e pertanto, per contenere i costi dell'opera si preferisce accettare tale rischio che non comporta perdite di vite umane e/o danni a cose.

2 CAPITOLO II

2.1 L'area oggetto di studio

La rete di drenaggio analizzata nel presente lavoro è situata nella città di Torino, precisamente nel piccolo rione di Borgo Dora, a ridosso dell'omonimo fiume. Il rione si trova nel quartiere Aurora, all'interno della circoscrizione VII e confinante con il centro storico cittadino. Il sobborgo è delimitato come segue:

- a nord da corso Vigevano e da corso Novara;
- a est dal fiume Dora Riparia (lungo Dora Firenze);
- a ovest da corso Principe Oddone;
- a sud dal corso Regina Margherita.

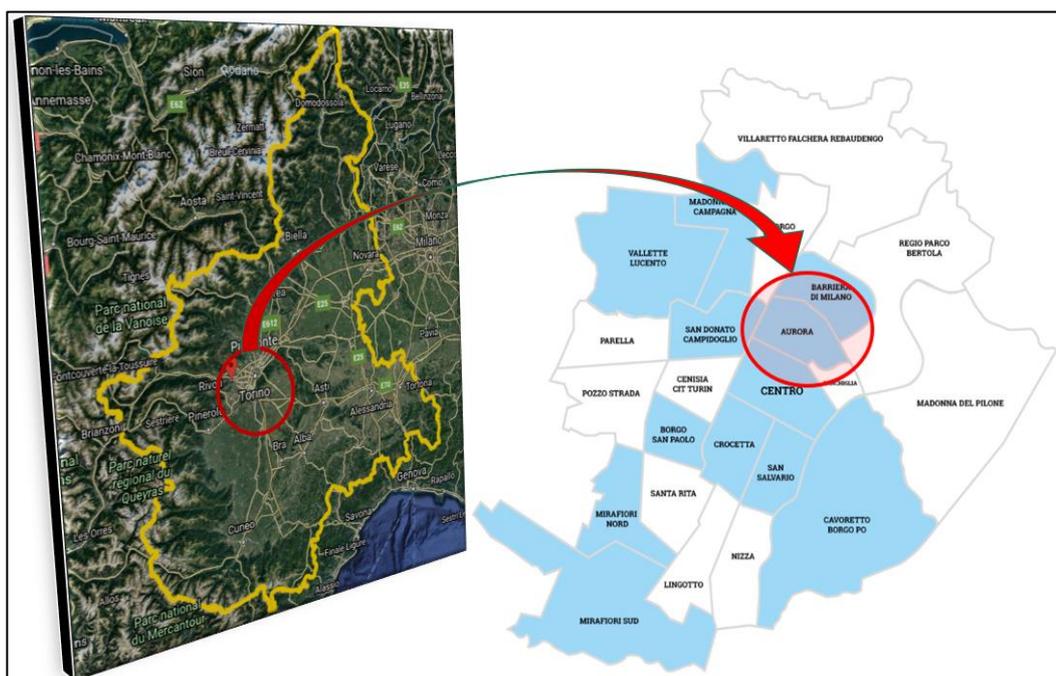


Figura 16: Individuazione dell'area di studio (elaborazione propria).

È un tessuto urbano multiforme quello che caratterizza il quartiere Aurora, segno di un trascorso burrascoso e luogo di grandi problematiche attuali sulla vita comune e, contemporaneamente, di grande patrimonio storico e sociale;

attualmente è in fase di espansione a livello socio-economico grazie ai vari programmi e progetti di sviluppo che lo riguardano.

2.2 Cenni storici

Quello di Borgo Dora è un piccolo rione storico all'interno del capoluogo piemontese. Il rione, che vanta un'antica e significativa storia, si sviluppa a ridosso del centro storico cittadino, con precisione a nord di corso Regina Margherita e in prossimità di Porta Palazzo; a nord è delimitato dal fiume Dora Riparia, mentre a ovest termina con l'adiacente rione Valdocco.

Nel tempo passato era noto come “Borgo del Pallone” o “del Ballone”, nel dialetto locale del “*Balon*” (da qui il nome dello storico mercato delle pulci che ha sede in Borgo Dora). Si tratta di un'area dalla forte identità storica, l'unica superstite delle quattro borgate che nascevano un tempo alle porte della città, nei rispettivi punti cardinali (il Borgo del Pallone rappresentava la borgata a nord delle mura).

In epoca romana l'area era una zona rurale abitata principalmente da agricoltori che lavoravano i campi. Durante il medioevo, poi, nel rione vennero realizzate delle cascine e dei mulini che prelevavano l'acqua dalla Dora e la trasformavano in energia, per alimentare le fabbriche; tante quelle sorte proprio qui a due passi dal centro storico (5 minuti appena dall'affollata e pedonale via Garibaldi). Il primo polo industriale di Torino, infatti, nacque intorno la metà dell'800 in queste strade.

Fino al 1962, in questa zona, passava il Canale dei Molassi (quattro metri di larghezza e tre di profondità) che usciva da via Lanino, passava per corso Giulio Cesare, attraversava piazza Don Albera e lo stabilimento dei Molassi. Un canale da 110 metri di percorso e 5'200 metri cubi di acqua al secondo, costeggiato da muretti e attraversato da una serie di ponticelli di cui, purtroppo, non c'è più traccia.

Intorno al 1700, il Re Vittorio Amedeo II commissionò all'architetto Filippo Juvarra il progetto della realizzazione di Piazza della Repubblica. Grazie alla realizzazione della Piazza e alle successive attività commerciali e industriali

presenti, all'inizio del XIX secolo, Borgo Dora rappresentava una delle aree più vive e ricche della città. L'arrivo dell'energia elettrica e lo spostamento delle fabbriche verso la periferia, ahimè, portano la zona a perdere le industrie e a trasformarsi nel quartiere degli artigiani, degli antiquari e del mercato delle pulci. Difatti, Borgo Dora è oggi molto conosciuta per il mercato del “Balon” del sabato e del “Gran Balon” di ogni seconda domenica del mese, in cui le sue viuzze si popolano di antiquari e rigattieri, di bancarelle vintage e di artigiani senza età che lavorano fuori dalle botteghe, sui marciapiedi antistanti. La sensazione è quella di passeggiare e di fare un tuffo indietro di 50 anni, a volte anche di più.



Figura 17: Immagine del rione di Borgo Dora (D'Ottavio M., 2013).

Gli agglomerati situati nel rione sono caratterizzati da un andamento curvilineo, imposto proprio dallo scomparso Canale dei Molassi.

Oltre agli edifici di comune abitazione e a quelli adibiti a esercizio commerciale e pubblico, in piazza Borgo Dora sorgono i due edifici storici del quartiere: l'ex Arsenale Militare e l'ex caserma Cavalli.



*Figura 18: Caserma Cavalli (sulla sinistra) e Arsenale della pace del SERMIG (sulla destra)
(Biamino B., 2010).*

L'Arsenale Militare col contributo volontario di migliaia di persone è, dal 1983, diventato l'Arsenale della Pace del *Sermig* (Servizio Missionario Giovani), ovvero un luogo di culto improntato al dialogo e all'accoglienza per i poveri con numerose e frequenti iniziative rivolte in particolare ai giovani. A sud della struttura, sorge il Cortile del Maglio: una sofisticata ma fruibile piazza coperta di quaranta metri per quaranta, racchiusa da quattro maniche perimetrali. Rappresenta ciò che era dell'antica area delle fucine, appartenente al complesso dell'Arsenale. Il suo nome deriva dallo strumento collocato al centro dello spazio, appunto un maglio antico, cioè una macchina utilizzata nel passato per la forgiatura e lo stampo di pezzi metallici.



Figura 19: Cortile del Maglio (Regis D., 2010).

Gli alberi metallici inclinati che oggi sostengono l'ampia copertura esaltano l'antico maglio appunto, che rappresenta un importante reperto storico e, che permette a questo spazio suggestivo di tramutarsi facilmente in sede di svariati tipi di eventi: spettacoli teatrali, saggi di danza, concerti, mostre, fiere e altro ancora.

Dinanzi al Sermig c'è un piccolo parco giochi dove, fino a novembre 2019, vi era una delle principali attrazioni del rione: il "Turin Eye". Un pallone aerostatico che offriva una vista mozzafiato della città e delle Alpi da un'altezza di 150 metri. Dopo 7 anni di attività la mongolfiera che solcava i cieli di Torino è stata fatta scendere ufficialmente a terra per alcuni problemi di manutenzione ed economici, per poi essere smontata definitivamente.



Figura 20: Panorama del quartiere Borgo Dora a Torino con il Turin Eye (Pasquino S.).

Un altro edificio storico del quartiere è l'ex caserma Cavalli, che dopo anni di degrado e abbandono oggi ospita la rinomata Scuola Holden; scuola di scrittura, cinema, serialità, giornalismo, sceneggiatura e storytelling. Essa ha ridato un forte contributo di rinascita alla vita sociale e culturale di questa zona, tanto che ne rappresenta un esempio di rivalutazione importante di Borgo Dora. Infatti, se prima la piazza era abbandonata e senza anima, oggi grazie al progetto di Alessandro Baricco la stessa è simbolo di vitalità: una moltitudine di studenti vanno e vengono, ma soprattutto vivono il borgo come una casa a cielo aperto.

Caratteristica adiacente del Borgo è la presenza dello storico mercato di Porta Palazzo, uno dei mercati all'aperto più grandi di Torino e d'Europa; tale presenza continua ad influenzare tutta la zona già dai primi anni della sua esistenza. Inoltre, in zona Lungo Dora Agrigento è presente la stazione di Torino Ponte Mosca, ormai sede del Museo Ferroviario Piemontese.

A partire dall'ultimo decennio, l'area è soggetta a un'intensa riqualificazione ambientale, fisica ed economica, il cui scopo è il miglioramento del quartiere senza modificarne atmosfera e vitalità, mantenendo viva la sua storia e la sua memoria.

Di contro, le diverse etnie e classi sociali che situano in Borgo Dora hanno problemi di integrazione e di occupazione, quindi il suo territorio anche se profondamente differenziato al suo interno, è oggi centro di interesse, di studio e di riqualificazione urbanistica.

2.3 Origine del lavoro

La Regione Piemonte in funzione delle sue caratteristiche geografiche e climatiche è stata frequentemente colpita da eventi alluvionali. Dal 1800 ad oggi i principali eventi sono stati oltre 120, con una frequenza media di circa uno ogni 20 mesi.

C'è da considerare che, l'enorme espansione degli abitati e delle infrastrutture avvenuta a partire dall'ultimo dopoguerra faccia sì che, a parità di evento alluvionale (in termini di quantità e durata delle piogge) oggi si abbiano molti più danni che in passato, essendo esponenzialmente aumentati gli "elementi" sul territorio soggetti a danni (fabbricati, strade, infrastrutture, ecc.).

Nell'ultima settimana di agosto 2016 la situazione meteorologica sulla penisola italiana – e in modo particolare sulla regione Piemonte – è stata caratterizzata da un promontorio anticiclonico persistente proveniente dal nord Africa, molto stabile, che ha garantito su tutta la regione un tempo ben soleggiato e temperature di circa 4-5°C al di sopra della norma di fine agosto, con dei tassi di umidità media giornaliera che lunedì 29 agosto, sulle zone pianeggianti, si sono assestati attorno al 60-70%.

Tali condizioni climatiche iniziali, contraddistinte da alta pressione e marcata umidità presente negli strati più bassi, sono molto sensibili al contrasto con l'aria più fredda e, quindi, favoriscono in determinate situazioni la formazione di

celle temporalesche intense, che spesso si associano a fenomeni che provocano la caduta della grandine. Nel corso della giornata di lunedì 29 agosto, infatti, il promontorio presente sul Piemonte è ceduto progressivamente a causa della discesa di una saccatura nord-atlantica sul Mediterraneo centro-occidentale.

In questa particolare configurazione, i venti in quota sul Piemonte ruotano da ovest a sud-ovest mentre al suolo si dispongono da nordest creando una convergenza delle correnti, sebbene non particolarmente marcata, a ridosso della fascia pedemontana occidentale della regione Piemonte.

Nella figura 21 è riportata l'immagine dell'Europa, scattata dal satellite Meteosat, alle ore 17:00 UTC (Tempo Coordinato Universale) di lunedì 29 agosto 2016 e che mostra nitidamente la linea di demarcazione tra la bassa pressione, associata alla saccatura atlantica in spostamento da ovest verso est, e l'alta pressione pre-esistente sull'Italia, ovvero ciò che ne rimane dell'anticiclone africano persistente sulla penisola nei giorni antecedenti. Si nota bene che, pure la catena montuosa delle Alpi crea una sorta di sbarramento, a tal punto da intravedere che la saccatura tenda a piegarsi nella sua zona meridionale, laddove darà origine al cut-off nella giornata successiva.

Il marcato contrasto termico tra l'aria calda presente sull'Europa centro-orientale e l'aria più fredda, associata alla saccatura, innesca una serie di celle temporalesche che dalla Spagna nord-orientale si estendono lungo il continente e fino alla Polonia. Pertanto, sul territorio piemontese i temporali si sviluppano lungo la fascia pedemontana occidentale e sul Lago Maggiore a partire dalle ore 17:00 UTC, crescendo e spostandosi da ovest verso sud-est, interessando gran parte della regione per poi attenuarsi ed esaurire la loro fase convettiva nella notte tra lunedì e martedì.

I valori di temperatura registrati dalla stazione meteorologica di via della Consolata a Torino determinano un improvviso abbassamento delle temperature al suolo, tanto che la temperatura dell'aria scende bruscamente di circa 5°C (da 26.9 °C a 21.5 °C) in appena mezz'ora tra le 19:00 e le 19:30 UTC.

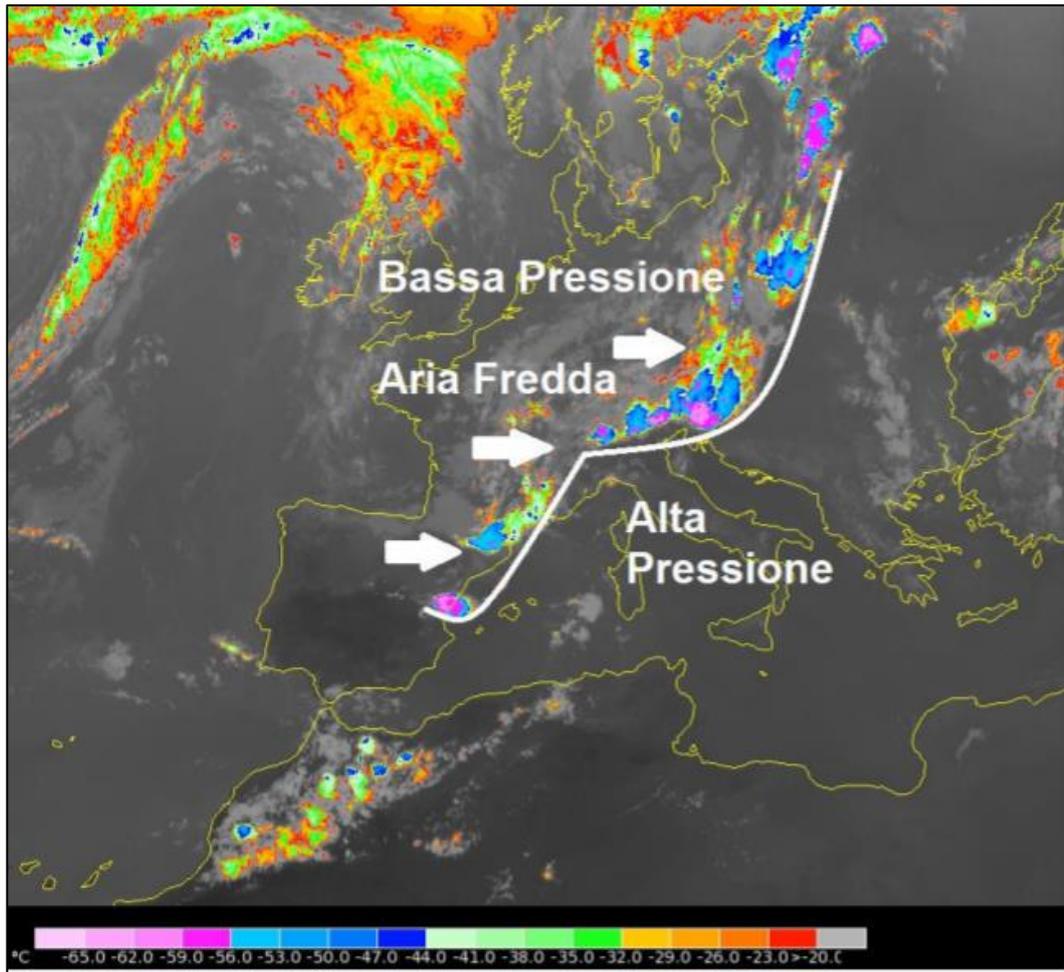


Figura 21: Immagine dal Meteosat della situazione in Europa alle ore 17:00 del 29 agosto 2016 (ARPA Piemonte, 2016).

Inoltre, la forte perturbazione è stata contrassegnata dalla notevole quantità d'acqua che si è scaricata al suolo in un brevissimo lasso di tempo sulla città metropolitana di Torino. La figura 22 evidenzia un'immagine radar ad alta risoluzione spaziale in cui è riportata la cumulata delle precipitazioni tra le 19:15 e le 19:45 UTC. Si può notare il nucleo di massima precipitazione localizzato sul Comune di Druento (TO), dove si rileva un accumulo di oltre 50 mm in 30 minuti.

L'intensità istantanea di precipitazione, in generale, ha raggiunto valori di circa 200 mm/h in corrispondenza degli acquazzoni più violenti. Quindi, l'evento temporalesco ha portato, in 15-20 minuti, un accumulo di pioggia sull'area urbana

e sub-urbana dell'ordine di 50-70 mm, come riportato dai pluviometri di Torino in via della Consolata e Santena.

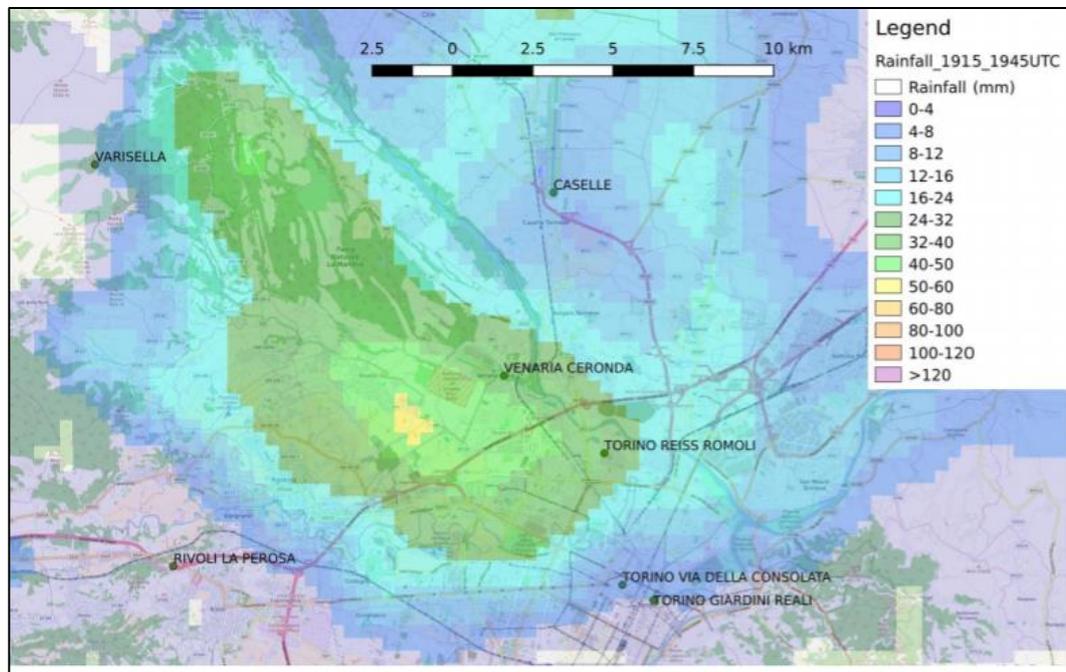


Figura 22: Cumulata di precipitazione su 30 minuti (dalle 19:15 alle 19:45 del 29 agosto 2016) (ARPA Piemonte, 2016).

Tenendo presente che, nella regione Piemonte le precipitazioni nel mese di agosto sono state scarse quasi ovunque e che quelle dell'evento analizzato sono state a carattere temporalesco, seppur localmente intense, non si sono registrati degli incrementi significativi dei livelli dei corsi d'acqua.

2.4 Descrizione della rete

Il programma di calcolo adottato per modellare il comportamento della rete di drenaggio è stato *SWMM* (*Storm Water Management Model*). Un modello basato sulla gestione delle acque piovane e capace di simulare il fenomeno dinamico di afflussi-deflussi. Il software trasforma le precipitazioni meteoriche che si riversano su un insieme di aree in deflusso. Per far ciò, l'intera area oggetto di studio nel rione di Borgo Dora è stata suddivisa in sottobacini, per cui sono state eseguite delle

simulazioni con eventi meteorici di diversa intensità e durata. La rete di drenaggio in questione si sviluppa su una superficie totale di quasi 75 ettari.



Figura 23: Rione Borgo Dora durante l'evento temporalesco del 29 agosto 2016 (Lorenzetti S., 2019).

L'interessamento particolarmente a quest'area è motivato dal fatto che l'evento di fine agosto del 2016 non è stato l'unico in cui si sono verificati degli allagamenti.

Difatti, questi episodi sono accaduti con una certa frequenza e ogni volta hanno provocato disagi agli abitanti del quartiere, nonché ai locali e alle attività commerciali presenti.

In seguito a tali eventi, la *SMAT* ha stipulato un contratto di ricerca con il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (*DIATI*) del Politecnico di Torino al fine di: analizzare le cause di tali allagamenti,

evidenziare le criticità del sistema di drenaggio e di comprendere come risolvere il problema.

Il modello dello stato attuale della rete, realizzato col software *SWMM*, e le relative considerazioni idrauliche ed idrologiche sono state eseguite dal Prof. Fulvio Boano, dall'Ing. Stefano Losero e dal Prof. Luca Ridolfi (responsabile) per la *SMAT*. Il materiale da loro sviluppato è stato indispensabile, nonché il punto di partenza, per realizzare il presente lavoro di tesi.

Una prima parte del lavoro è stata svolta nell'autunno 2016 e ha riguardato l'identificazione delle problematiche in fase preliminare. In questo contesto sono state evidenziate, sostanzialmente, criticità relative al sottodimensionamento dei collettori presenti nelle zone allagate. La seconda fase dello studio è stata svolta nei mesi successivi, con scopo mirato a esaminare e approfondire il lavoro svolto durante la fase preliminare.

I collettori della rete di drenaggio in questione sono situati in: via Borgo Dora, via Andreis, via Andreis interno 18, Lungo Dora Agrigento, Lungo Dora Savona e nel Canale delle Sabbionere.

Durante la prima fase di studio sono stati eseguiti una serie di sopralluoghi inerenti la zona oggetto di studio, così da poter definire con maggiore dettaglio le aree drenate dai collettori di via Andreis e di via Andreis interno 18. In tal modo, è stato possibile rappresentare in maniera realistica il comportamento idraulico di tali condotti durante l'evento, chiarire l'effettivo percorso delle acque meteoriche all'interno della rete fognaria e valutare eventuali incongruenze con la cartografia.

Le portate convogliate dai collettori dell'area di studio sono scaricate attraverso il Canale dei Molassi nel Fiume Dora Riparia.

2.4.1 Aree drenate

Il programma *SWMM* rappresenta le superfici drenate come dei sottobacini. In totale nel modello sono state considerate 10 macro aree nelle quali è possibile

La larghezza equivalente si ottiene dividendo l'intera area del sottobacino per la media delle massime lunghezze di drenaggio, nell'ipotesi che l'acqua segua principalmente i percorsi definiti dalla sede stradale. Per i coefficienti di scabrezza di Manning sono stati utilizzati dei valori tipici impiegati per la progettazione idraulica urbana considerando, anche, una certa quota di infiltrazione nel terreno.

Le pendenze dei vari sottobacini sono state valutate considerando le quote del terreno riportate nella cartografia esistente.

In merito all'infiltrazione, essa è stata valutata utilizzando il metodo del CN (*Curve Number*) con coefficiente pari a 98, tipico per le aree urbanizzate.

Le aree in prossimità dei collettori sono state discretizzate in maniera più dettagliata (figura 25), al fine di poter simulare più coerentemente la propagazione di piena all'interno di essi. La suddivisione dei sottobacini è stata fatta in base alla posizione dei chiusini, assegnando ad essi la portata generata dall'area compresa tra metà del tratto di collettore a monte e metà di quello a valle.

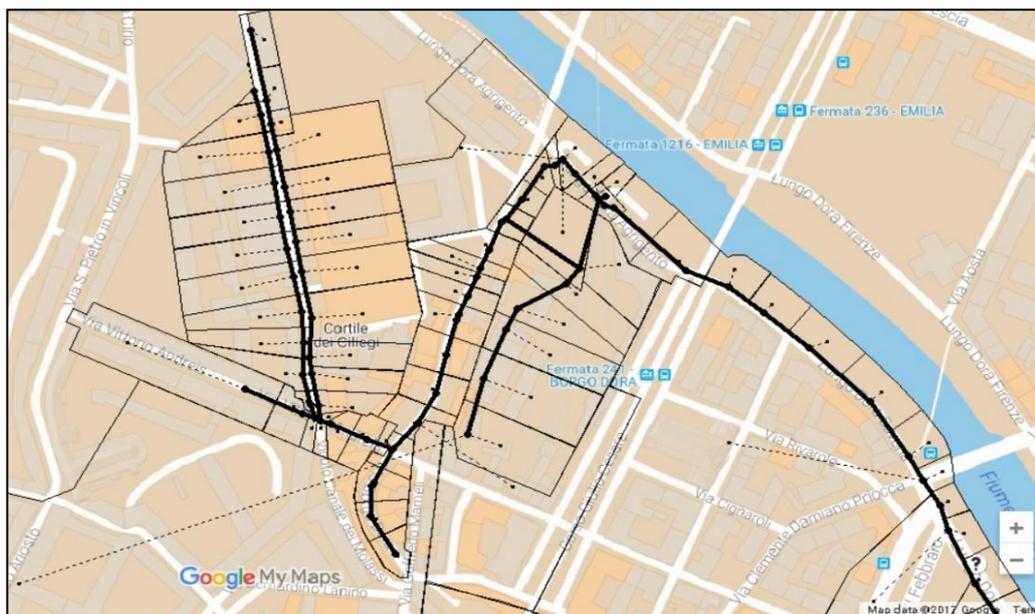


Figura 25: Discretizzazione delle aree in prossimità dei collettori (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

2.4.2 Collettori

Nel modello è stato necessario definire la geometria dei collettori esistenti impostando tre proprietà fondamentali, ricavate dalla cartografia: quota del fondo, lunghezza e sezione.

I collettori con sezioni ovoidali non commerciali, ovvero non conformi con la geometria standard di *Phillips*, sono state inserite manualmente. Le pendenze di ogni tratto sono state ricavate dalla cartografia tecnica fornita da *SMAT*.

Dalla figura 26 è possibile notare che in via Andreis, dall'incrocio con via San Pietro in Vincoli fino al civico 28, non è presente nessuna condotta. In via Andreis interno 18 sono presenti due tubature di forma circolare con la stessa sezione, mentre quella presente in via Andreis ha forma ovoidale.

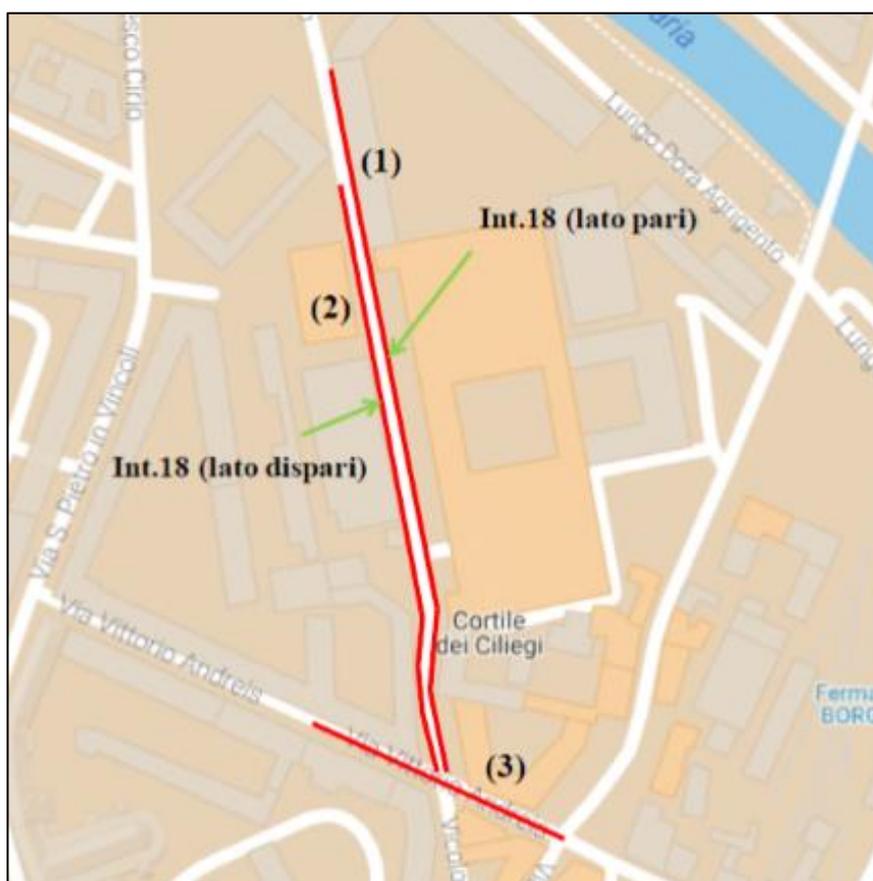


Figura 26: Caratteristiche collettori esistenti in via Andreis int.18 e via Andreis (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

Tabella 1: Caratteristiche collettori esistenti in via Andreis int.18 e via Andreis (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

Collettore	Sezione	Dimensione [mm]	Lunghezza [m]	Materiale
(1)	Circolare	500	311,4	PVC
(2)	Circolare	500	273,7	PVC
(3)	Ovoidale	600x900	123,0	c.a.

In via Borgo Dora il collettore è suddiviso in due tronchi di sezioni omogenee, entrambi con geometria ovoidale (figura 27).

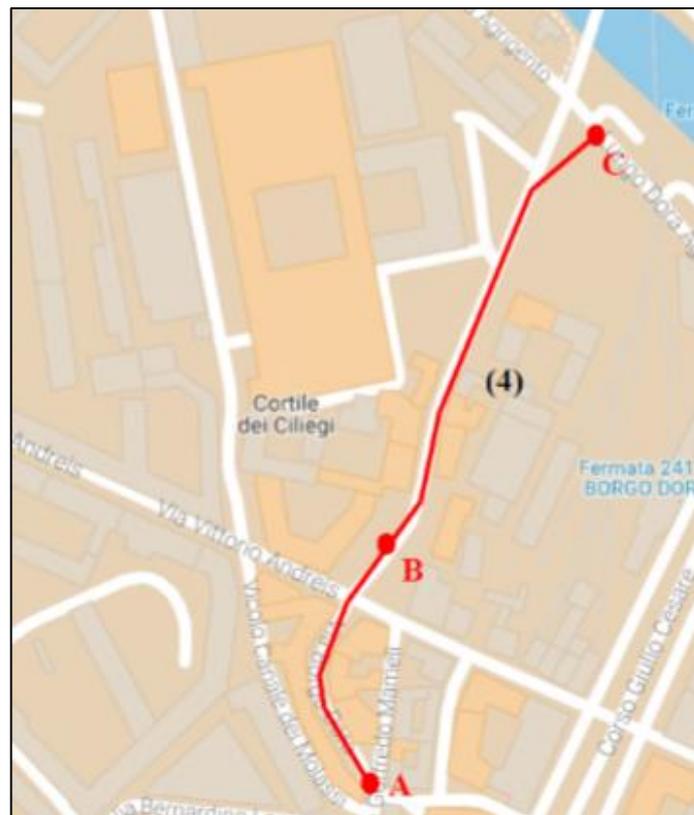


Figura 27: Collettore esistente in via Borgo Dora (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

Tabella 2: Caratteristiche collettori esistenti in via Borgo Dora (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

Collettore	Sezione	Dimensione [mm]	Lunghezza [m]	Materiale
(4) A-B	Ovoidale	600x900	114,0	c.a.
(4) B-C	Ovoidale	800x1200	232,5	c.a.

Il collettore situato sul Lungo Dora presenta numerose eterogeneità dal punto di vista dimensionale; si alternano delle sezioni ovoidali, scatolari e a voltino. Inoltre, nel tratto terminale, dal punto D, prima di arrivare allo scarico, il collettore si dirama in due condotti distinti (D-E e D-F) a sezione ovoidale ciascuno, aventi dimensioni inferiori rispetto al tratto C-D (figure 28 e 29) che si immettono all'interno del Canale dei Molassi (E'-E''), il quale avvicinandosi allo scarico lungo la Dora varia le sue dimensioni (tabella 3).



Figura 28: Collettore esistente in Lungo Dora Savona e Lungo Dora Agrigento (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

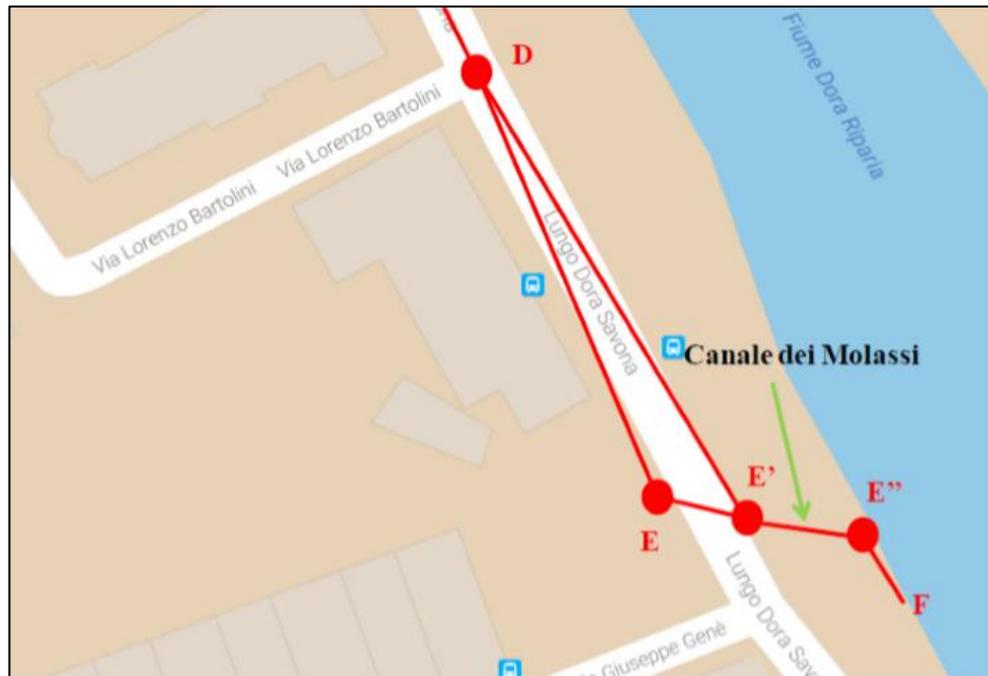


Figura 29: Particolare del tratto terminale del collettore in Lungo Dora Agrigento (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

Tabella 3: Caratteristiche collettore esistente in Lungo Dora Savona e Lungo Dora Agrigento (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

Collettore	Sezione	Dimensione [mm]	Lunghezza [m]	Materiale
(5) A-B	Ovoidale	800x1500	43,0	c.a.
(5) B	Scatolare	3000x1500	-	c.a.
(5) B-C	Ovoidale	800x1500	370,0	c.a.
(5) C-D	Ovoidale	700x1750	223,5	c.a.
(5) D-E	Ovoidale	700x1050	62,5	c.a.
(5) D-E'	Ovoidale	800x1500	78,0	c.a.
(5) E-E''	A voltino	5000x1500	40,0	vari
(5) E''-F	A voltino	4500x1500	39,0	vari

Un altro parametro necessario a definire i collettori è la scabrezza. Dato che non è possibile misurare direttamente tale parametro, durante le analisi sono stati ipotizzati due valori tipici dell'incertezza associata a tale parametro.

Nella tabella 4 vengono riportati i valori dei coefficienti di scabrezza di *Gauckler-Strickler* (k_s) ipotizzati inizialmente. Così facendo è stato possibile simulare le prestazioni della rete sia per le alte che per le basse scabrezze. All'interno del Canale dei Molassi, dato il carente stato manutentivo, è stata ipotizzata una scabrezza costante e maggiore rispetto a quelle adottate per gli altri collettori.

Tabella 4: Coefficienti di Gauckler-Strickler adottati inizialmente per simulare la scabrezza nei collettori (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

Materiale	k_s (basse scabrezze) [$m^{1/3}/s$]	k_s (alte scabrezze) [$m^{1/3}/s$]
c.a.	75	60
PVC	85	70
Vari (Molassi)	50	50

Il software per il calcolo delle portate all'interno dei collettori utilizza due differenti equazioni a seconda che il collettore risulti essere in pressione o meno. Quando il condotto non è in pressione, è utilizzata la relazione di *Manning*:

$$Q = \frac{1,49}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (2.2)$$

dove Q è la portata che circola nel collettore, A è la area della sezione trasversale, R è il raggio idraulico, S è la pendenza, n è il coefficiente di *Manning*, che è l'inverso del coefficiente di *Gauckler-Strickler*:

$$n = \frac{1}{k_s} \quad (2.3)$$

Qualora il collettore risultasse essere in pressione, alla relazione di *Manning* va aggiunto un coefficiente per tener conto dell'aumento della cadente piezometrica.

In conclusione, nell'analisi, per valutare gli eventuali allagamenti è stato fondamentale ricreare i profili longitudinali dei collettori, impostando la profondità dei collettori rispetto al piano campagna. Nella figura 30 si propone un esempio di profilo longitudinale ottenuto con *SWMM*. Si noti bene che, nella quasi totalità dei chiusini, la differenza di altezza è stata impostata all'interno dei nodi delimitanti i vari tratti di collettore.

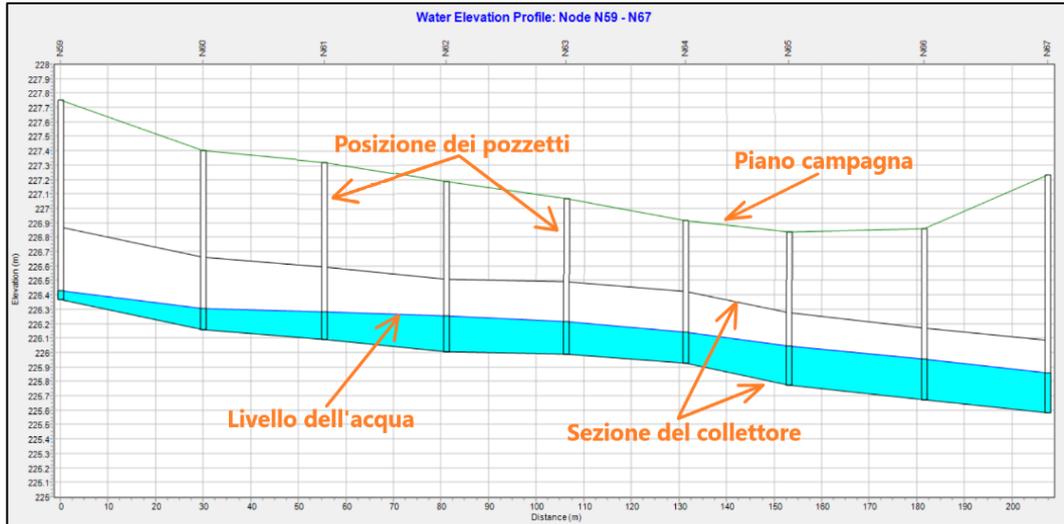


Figura 30: Esempio di un profilo longitudinale ottenuto con SWMM (elaborazione propria).

3 CAPITOLO III

Tutti i software in grado di sviluppare un modello di simulazione idraulica di una rete di drenaggio sono un sistema di forte sostegno, oltre a essere un utile strumento di calcolo per la gestione e la verifica di una rete di scolo delle acque. Con l'ausilio dei programmi di calcolo è possibile sia progettare sia verificare i nuovi elementi che vengono aggiunti nella rete, oppure, è possibile identificare gli eventuali malfunzionamenti degli elementi già disponibili, eseguire bilanci e prendere decisioni operative con giudizio, al fine di assicurare un servizio idoneo alla comunità.

Mediante il modello di simulazione idraulica è stato possibile analizzare il comportamento della rete di drenaggio urbana in varie situazioni, così da prevedere le possibili criticità che interesserebbero il sistema. Quindi, sarà fornito un appropriato supporto nella realizzazione dei piani d'intervento cosicché la cittadinanza usufruisca di un servizio più affidabile ed efficiente. Naturalmente, sviluppare un modello che riporti esattamente la realtà fisica della rete è impossibile. Bensì, con il lavoro di calibrazione tra i dati misurati e quelli simulati è stato possibile ottenere un modello che rispecchia, quasi realisticamente, i diversi scenari.

Per ottenere un modello di partenza che abbia dei risultati più o meno attendibili è necessario avere un'ampia conoscenza del sistema in questione, dalle proprietà geometriche e di gestione ai dati a disposizione, con un livello di informazione che è funzione del grado di dettaglio che si vuole raggiungere; ovviamente quanto più dettagliate e minuziose sono le informazioni in nostro possesso, tanto più realistica sarà la simulazione del software.

3.1 Il software di calcolo SWMM

Il programma di calcolo che ha permesso la realizzazione del modello idraulico della rete di drenaggio urbana nella zona di Borgo Dora, nel Comune di Torino, è stato *SWMM (Storm Water Management Model* ossia il modello di gestione delle acque piovane). Si tratta di un modello dinamico di gestione delle acque meteoriche, capace di simulare la trasformazione afflussi-deflussi sia per singoli eventi (durata di poche ore) sia per quelli in continuo (durata di diversi giorni o mesi).

Il software è stato per la prima volta prodotto e sviluppato nel 1971, dal *Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency (US-EPA)*, ed è gratuitamente scaricabile dal sito:

<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> .

L'ultima versione (*EPA SWMM 5.1*) è scritta nel linguaggio di programmazione C++ e utilizza il sistema operativo di *Windows* e sebbene mantenga la stessa struttura di calcolo delle versioni precedenti, quali scritte nel linguaggio di programmazione *Fortran77*, quest'ultima presenta alcune differenze. È infatti dotata di un'interfaccia grafica che ne facilita notevolmente l'utilizzo, sia in fase di introduzione delle reti e dei relativi parametri, sia nell'interpretazione e gestione dei dati ricavati dalle simulazioni.

Il software *SWMM* è adottato in tutto il mondo per la pianificazione, l'analisi e la progettazione legata al deflusso delle acque di pioggia su reti fognarie miste o separate, oppure, su canali aperti che presentano sezioni irregolari, fognature sanitarie e altri sistemi di drenaggio nelle aree urbane, con molte applicazioni anche in aree extra urbane. Inoltre, col software si rappresentano i diversi processi idrologici che generano il deflusso delle aree urbane, tra cui: la variabilità delle precipitazioni nel tempo e l'evaporazione delle acque stagnanti in superficie, l'accumulo e lo scioglimento della neve, l'intercettazione della pioggia, l'infiltrazione delle acque meteoriche negli strati insaturi del terreno, la percolazione di acqua infiltrata negli strati dell'acqua sotterranee tra l'acqua

freatica e il sistema di drenaggio, la riduzione del deflusso tramite pratiche di infrastrutture verdi.

L'analisi di tutti questi processi nello spazio si ottiene dividendo l'area di studio in una raccolta di aree più piccole e omogenee (sottobacini) – ognuna avente delle opportune caratteristiche di permeabilità. Il flusso terrestre può essere instradato tra le sotto-aree, tra i sottobacini o tra i punti di entrata di un sistema di drenaggio. Questo modello è poi di tipo distribuito, poiché viene presa in considerazione la variabilità spaziale sia delle precipitazioni in ingresso al sistema e sia delle portate, nonché delle diverse proprietà del bacino.

Nella rappresentazione del sistema fognario è possibile gestire reti di estensione illimitata e usufruire di un'ampia scelta di forme di condotte e canali, oltre ad avere la possibilità di modellare strutture particolari di trattamento e stoccaggio.

Il programma di calcolo *SWMM* lavora trasformando le piogge che precipitano sui sottobacini (nel software denominati *subcatchments*) in portata che defluisce attraverso una rete di canali e collettori, tubazioni, dispositivi di stoccaggio e sistemi di trattamento, pompe, orifizi e regolatori (figura 31). Per cui, la zona di Borgo Dora è stata suddivisa in sottobacini per i quali sono state svolte simulazioni con diversi eventi di pioggia.

Il software è in grado di memorizzare le variazioni nel tempo delle proprietà relative al deflusso prodotto in ogni sottobacino, nonché, di registrare le modifiche che subiscono le portate che circolano all'interno dei collettori e dei canali. Un ulteriore, e fondamentale, potenzialità del programma è di poter modellare i fenomeni legati al ciclo idrologico dell'acqua. Infatti, è possibile sottrarre alla portata entrante nel sistema di drenaggio, i contributi legati all'evapotraspirazione e all'infiltrazione del sottobacino.

Il programma è corredato da un ambiente integrato per la modifica dei dati d'ingresso dell'area di studio, l'esecuzione di simulazioni idrologiche, idrauliche e di gestione sulla qualità delle acque e, la visualizzazione dei risultati in una molteplicità di formati. Quest'ultimi, includono aree di drenaggio di colore

diversificato e mappe del sistema di trasporto e grafici e tabelle di serie temporali, grafici di profili e analisi statistiche di frequenza.



Figura 31: Elementi costituenti una rete di drenaggio urbana mista o separata (EPA SWMM, 2015).

In *SWMM* le varie grandezze sono considerate funzione dello spazio e del tempo e, nei diversi "subcatchments", sono considerate globali. Difatti, come primo passo viene elaborato l'idrogramma in uscita da ogni singolo sottobacino.

Successivamente, proseguendo da monte verso valle, per ciascun canale è simulata l'interazione tra la risultante di tutti gli idrogrammi che si hanno per singolo sottobacino, con l'idrogramma del sottobacino diretto. Ovviamente, quanto più è accurata la discretizzazione dei sottobacini tanto più si avrà una simulazione che è in grado di rappresentare precisamente il fenomeno fisico reale.

Il periodo di tempo impiegato per le simulazioni può riguardare un lasso di tempo esteso, comprendente numerosi eventi meteorologici intervallati da fasi di tempo di asciutto; perciò si possono svolgere delle simulazioni di tipo continuo anche per lunghi periodi.

Nel programma è possibile progettare o verificare le reti di drenaggio, oppure svolgere delle valutazioni idrologiche e idrauliche. Infatti, esso implementa i principi di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto, inoltre presenta la possibilità di realizzare calcoli e simulazioni idrauliche attraverso l'integrazione numerica e la risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant², su una rete di canali o condotte sollecitata da eventi meteorici avendo, anche, la possibilità di monitorare diverse tipologie di inquinanti.

3.2 La struttura del programma SWMM

Come è possibile osservare dalla figura 32, il funzionamento di una rete di drenaggio in *SWMM* si basa sullo scambio di flussi di acqua e di materiali tra i quattro diversi comparti:

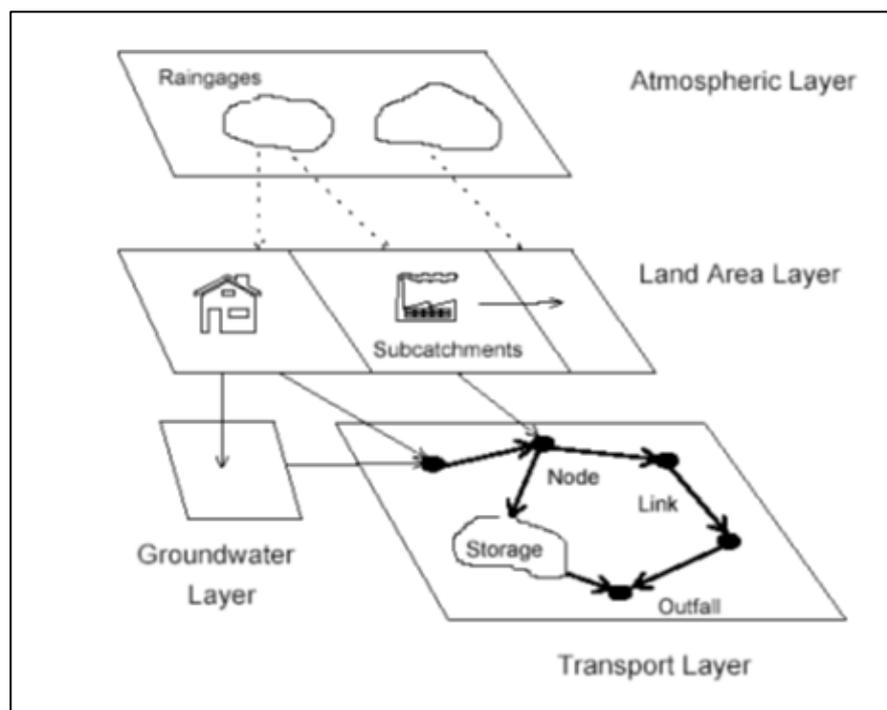


Figura 32: Concettualizzazione di un'area di drenaggio in *SWMM* (Baratti E, 2009).

² **Adhémar-Jean-Claude Barré de Saint-Venant** (Villiers-en-Bière, 23 agosto 1797 – Saint-Ouen, 6 gennaio 1886) è stato un matematico e ingegnere civile francese. Ottenne i più significativi risultati nello studio della resistenza dei materiali e della teoria dell'elasticità, di cui è considerato uno dei fondatori.

Nel comparto **atmosfera** (*atmospheric layer*) si genera l'evento atmosferico (pioggia o neve) che determina il deflusso superficiale o l'infiltrazione nel blocco "superficie terreno". In questo comparto si definiscono i valori di pioggia che la simulazione utilizza per le precipitazioni sul bacino. Gli oggetti principali utilizzati per modellare il processo di precipitazione/deflusso sono i misuratori di pioggia "*Rain Gage*". Lo scioglimento della neve (*Snowmelt*) è modellato con oggetti "*Snow Packs*" posizionati sopra i sottobacini.

Il comparto **superficie terreno** (*land area layer*) è rappresentato da uno o più sottobacini che ricevono la precipitazione (pioggia o neve) dal comparto atmosfera. Inoltre, i sottobacini inviano il deflusso sotto forma di evaporazione nel blocco "atmosfera", sotto forma di infiltrazione nel comparto delle "acque sotterranee" oppure di deflusso superficiale e carichi inquinanti in quello "trasporto".

Il comparto **acque sotterranee** (*groundwater layer*) riceve l'infiltrazione dal blocco "superficie terreno" e trasferisce una parte di questo afflusso al blocco di "trasporto" come intercettazione delle acque sotterranee. Gli oggetti "*Aquifers*" posizionati sotto i sottobacini sono usati per modellare il flusso delle acque sotterranee.

Il comparto **trasporto** (*transport layer*) contiene l'insieme degli elementi di convogliamento (canali, condotte, impianti, tubi, pompe e regolatori) e delle unità di stoccaggio/trattamento che convogliano le acque verso le strutture di trattamento o direttamente ai nodi di uscita. Il programma *SWMM* adotta una rappresentazione della rete che si basa su una geometria costituita da collegamenti (*Links*) e nodi (*Nodes*), i quali connessi fra di loro permettono una riproduzione di tipo idraulica dell'intero sistema di deflusso. Nel comparto trasporto si esegue il calcolo della propagazione nel sistema, optando tra varie opzioni: moto uniforme, onda cinematica e moto vario, basati sulla risoluzione completa delle equazioni di *De Saint Venant*. Con quest'ultima opzione il programma permette di eseguire i calcoli in maniera più rigorosa, poiché vengono modellati anche i fenomeni di rigurgito, moto a pelo libero, moto in pressione e inversione del flusso nei collegamenti.

Il programma di calcolo è strutturato in maniera fondamentale modulare (figura 33), costituito da singoli blocchi, ognuno dei quali ha uno specifico ruolo e pratica di calcolo. Ogni comparto si può impiegare in maniera individuale oppure in cascata (figura 34), così che il risultato di uno possa essere inteso come base di partenza per l'utilizzo del comparto susseguente, con la sola eccezione del comparto “*Runoff*”, il quale ammette come ingressi esclusivamente i dati di precipitazione provenienti dai moduli di “Pioggia” e “Temperatura”.

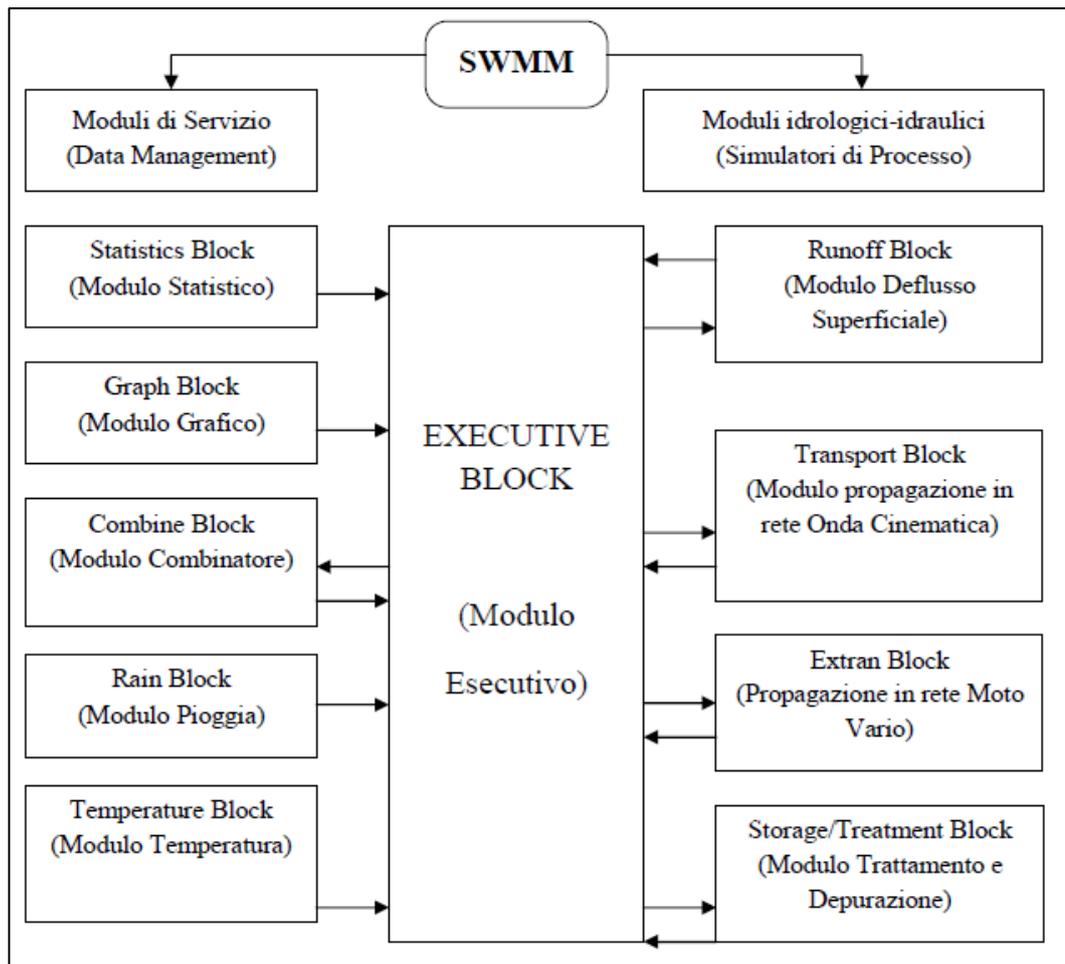


Figura 33: Schema della struttura modulare e relazionale tra i moduli di SWMM (Baratti E, 2009).

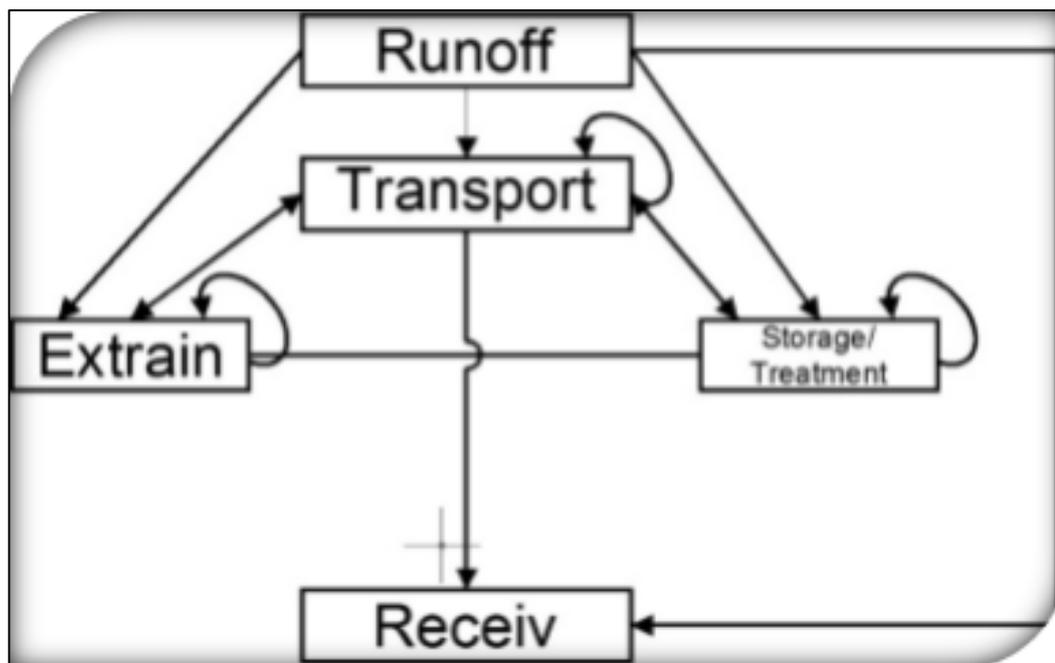


Figura 34: Legami possibili tra i diversi comparti del software (Semprini E., 2010).

3.3 Descrizione dei moduli di SWMM

Come accennato in precedenza, il software *SWMM* è suddiviso in due moduli. Uno di **servizio**, e uno **computazionale** di tipo idrologico-idraulico.

Il primo modulo, quello di **servizio**, è a sua volta ripartito in una serie di comparti che consentono di elaborare i risultati ottenuti. Infatti, si possono eseguire operazioni statistiche sui valori ottenuti dalle simulazioni attraverso il modulo statistico (*Statistics Block*); gestire i dati metereologici e climatici da inserire nel software, i quali sono utilizzati nel corso di simulazioni in continuo con il modulo temperatura (*Temperature Block*) e modulo pioggia (*Rain Block*); gestire i risultati ottenuti attraverso i grafici e le stampe nel modulo grafico (*Graph Block*); sistemare i valori d'uscita dal programma così da potere aggregare i dati utilizzabili dai moduli in cascata con il modulo combinatore (*Combine Block*). Ai moduli di servizio appartiene anche il modulo esecutivo (*Executive Block*), il quale manipola i file d'interfaccia tra i vari blocchi e il blocco, oppure la sequenza di blocchi, da eseguire.

Il secondo modulo, ossia quello **computazionale**, contiene quattro moduli con i relativi simulatori di processo idrologico e idraulico: un modulo di deflusso superficiale (*Runoff Block*) per la modellazione del deflusso superficiale; un modulo di propagazione nella rete dell'Onda Cinematica (*Transport Block*) per il calcolo della propagazione in rete con la schematizzazione dell'onda cinematica; un terzo è il modulo di propagazione nella rete del Moto Vario (*Extran Block*) di calcolo dinamico basato sulla risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant che governano il fenomeno idraulico di propagazione all'interno della rete; infine un modulo di Trattamento e Depurazione (*Storage/Treatment Block*) che descrive i processi all'interno di un impianto di trattamento.

Il *Runoff Block* è il primo passo di una simulazione in *SWMM*. Il modulo riceve in ingresso i dati meteorologici registrati dal *Rain Block* e dal *Temperature Block*, oppure si possono introdurre degli ietogrammi – con intensità o volume di pioggia e con tempo o precipitazione totale espressa in mm/tempo – realizzati dall'utente. Il modulo *Runoff* studia il processo afflussi-deflussi impiegando un approccio basato sulla tecnica dei serbatoi non lineari, con una opzione per il calcolo del contributo dell'acqua proveniente dallo scioglimento della neve. Inoltre, vengono analizzati i processi di infiltrazione e di evaporazione, così da poter ottenere come risultato il tracciamento dell'idrogramma per ogni ramo della rete analizzata. Il modulo si può impostare per realizzare simulazioni per periodi temporali che vanno dai pochi minuti agli anni. *Runoff* offre anche la possibilità di simulare la qualità delle acque, in termini di analisi dei processi di spostamento dei contaminanti dalle superfici scolanti alla rete di fognatura o di scolo. L'output di questo modulo consiste in idrogrammi che fungono da ingresso alla rete di drenaggio.

Il *Transport Block*, che può seguire il lancio del *Runoff Block*, modella invece il comportamento qualitativo e quantitativo della rete, attenendo il calcolo idraulico sulla schematizzazione dell'onda cinematica. L'analisi qualitativa è basata su cinetiche del primo ordine, con criteri di Shield sull'inizializzazione del moto. I risultati consistono in livelli, in portate e concentrazione di sostanze contaminanti per ogni componente della rete, schematizzata in un sistema di rami e nodi.

Lo *Storage/Treatment Block* può simulare fino a tre inquinanti in un serbatoio contenente, a sua volta, fino a cinque unità o processi. Il modulo, poi, simula i processi di decadimento del primo ordine associati a una miscelazione completa, funzioni di rimozione e di dinamica di sedimentazione. Inoltre, è possibile prevedere i costi di avvio e di gestione e di manutenzione per ogni unità di trattamento.

L'*Extended Transport Block* – anche detto *Extran Block* – costituisce il cuore idraulico del programma di calcolo *SWMM*; infatti, esso permette di modellare la propagazione dei deflussi all'interno della rete attraverso la risoluzione completa delle equazioni di *De Saint Venant*. È un modulo completo per la simulazione delle reti ramificate o a maglia. Sono modellati anche i fenomeni di rigurgito, le inversioni del flusso nei rami, i moti a pelo libero e in pressione. *Extran Block* adotta una raffigurazione topologica della rete basata su una geometria di rami e nodi. Quest' ultimi presentano opportune caratteristiche efficacemente configurabili che, se combinate tra loro, sono in grado di descrivere idraulicamente l'intera rete di deflusso. Nella rappresentazione utilizzata dal modulo, i rami sono essenzialmente i condotti della rete fognaria o i canali nel caso di sezioni aperte. Essi consentono di estendere le portate da un nodo all'altro. I nodi rappresentano i pozzetti presenti nel sistema fognario (nel caso dei collettori fognari) o i punti di intersezione dei rami (nel caso dei canali a cielo aperto). Nei nodi sono concentrate le portate in ingresso provenienti dal *Runoff Block*, generate a partire dal modello afflussi-deflussi, e le portate uscenti dalla rete.

L'utilizzo del modulo *Extran* è preferibile qualora fosse necessario riportare le condizioni di rigurgito e di inversioni di flusso, nonché quando siano presenti organi speciali di regolazione come: sfioratori, pompe e bacini d'accumulo. Mentre, per la simulazione dei canali e delle piccole condotte nelle aree più a monte del sistema, dove meglio reggono le assunzioni di serbatoi non lineari in cascata e di moto uniforme, si addice meglio alle caratteristiche dei moduli di *Runoff* e *Transport*, i quali essendo più semplici permettono una migliore capacità computazionale (minore tempo di simulazione, minore capacità di calcolo, ecc.).

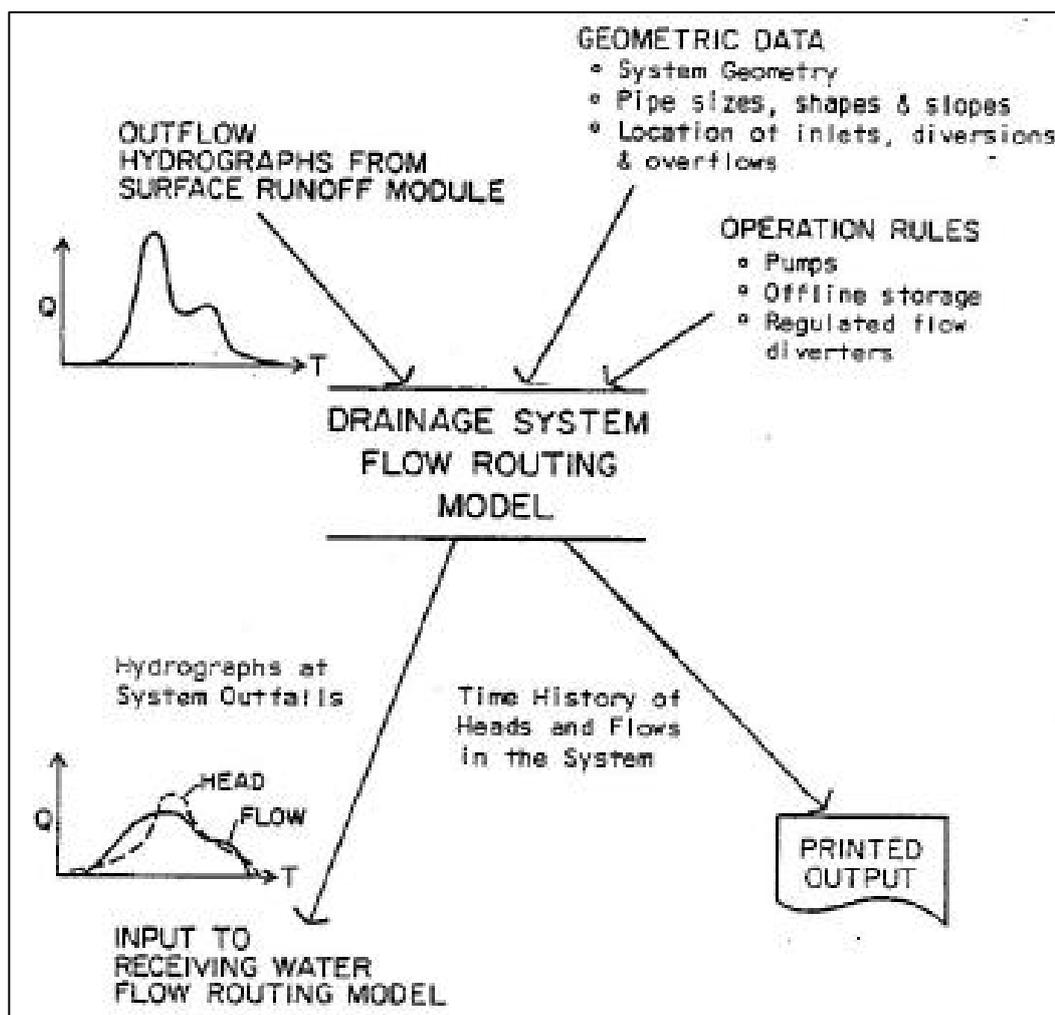


Figura 35: Rappresentazione schematica del blocco Extran (Baratti E, 2009).

3.4 I moduli di progetto di SWMM

All'avvio della versione 5.1 del software *EPA SWMM*, si presenta un'interfaccia come si riporta in figura 36, nella quale sono riportati i principali comandi per la rappresentazione del modello. Durante la fase di progettazione iniziale vengono inserite le informazioni a disposizione riguardanti la morfologia del territorio, la conformazione della rete di drenaggio ed i dati riguardanti gli eventi atmosferici.

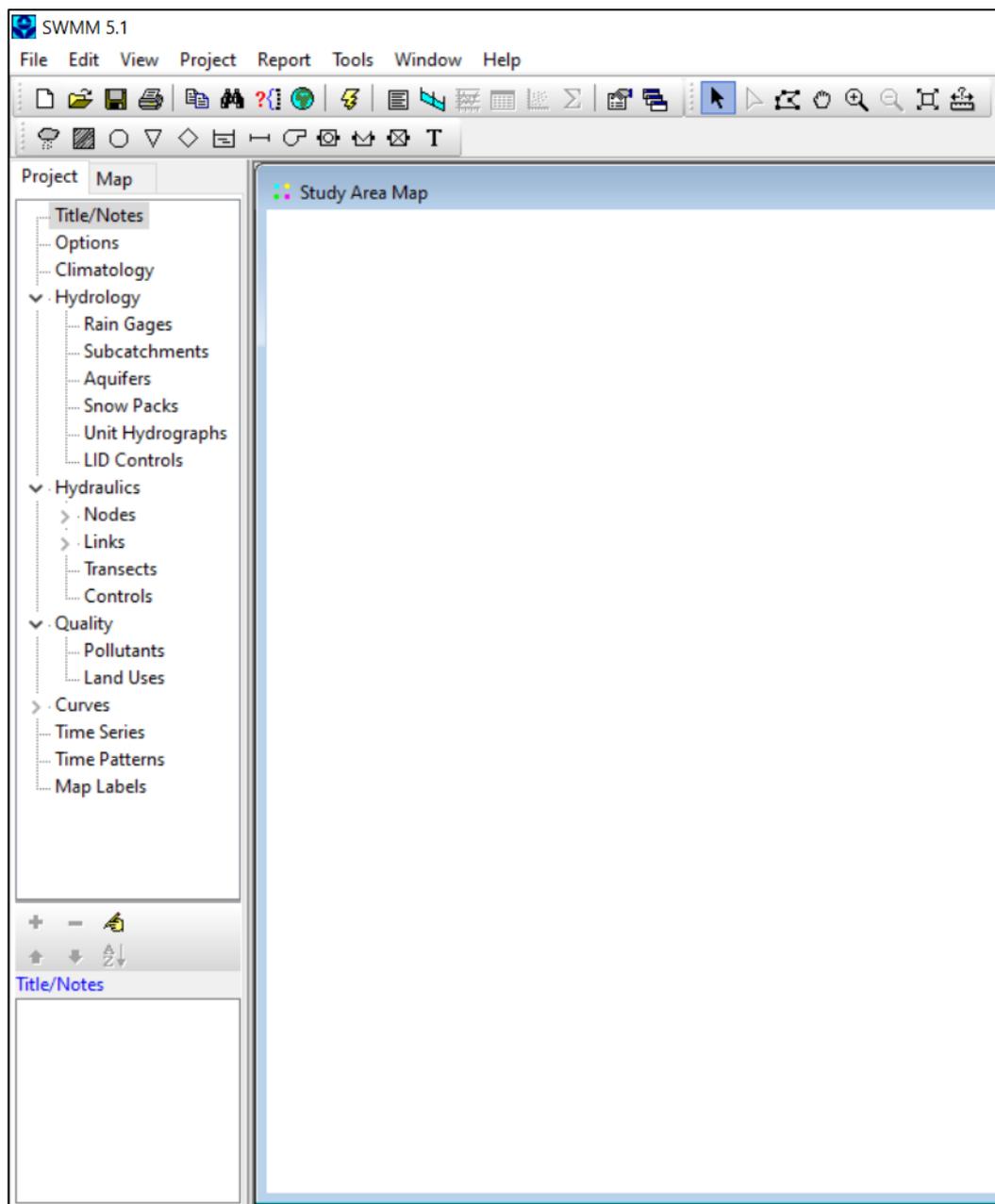


Figura 36: Finestra di apertura del software SWMM (elaborazione propria).

Il programma è suddiviso in 3 moduli di progetto principali, come riportato nella figura 37:

- Modulo idrologico (*Hydrology*);
- Modulo idraulico (*Hydraulics*);
- Modulo di qualità (*Quality*).

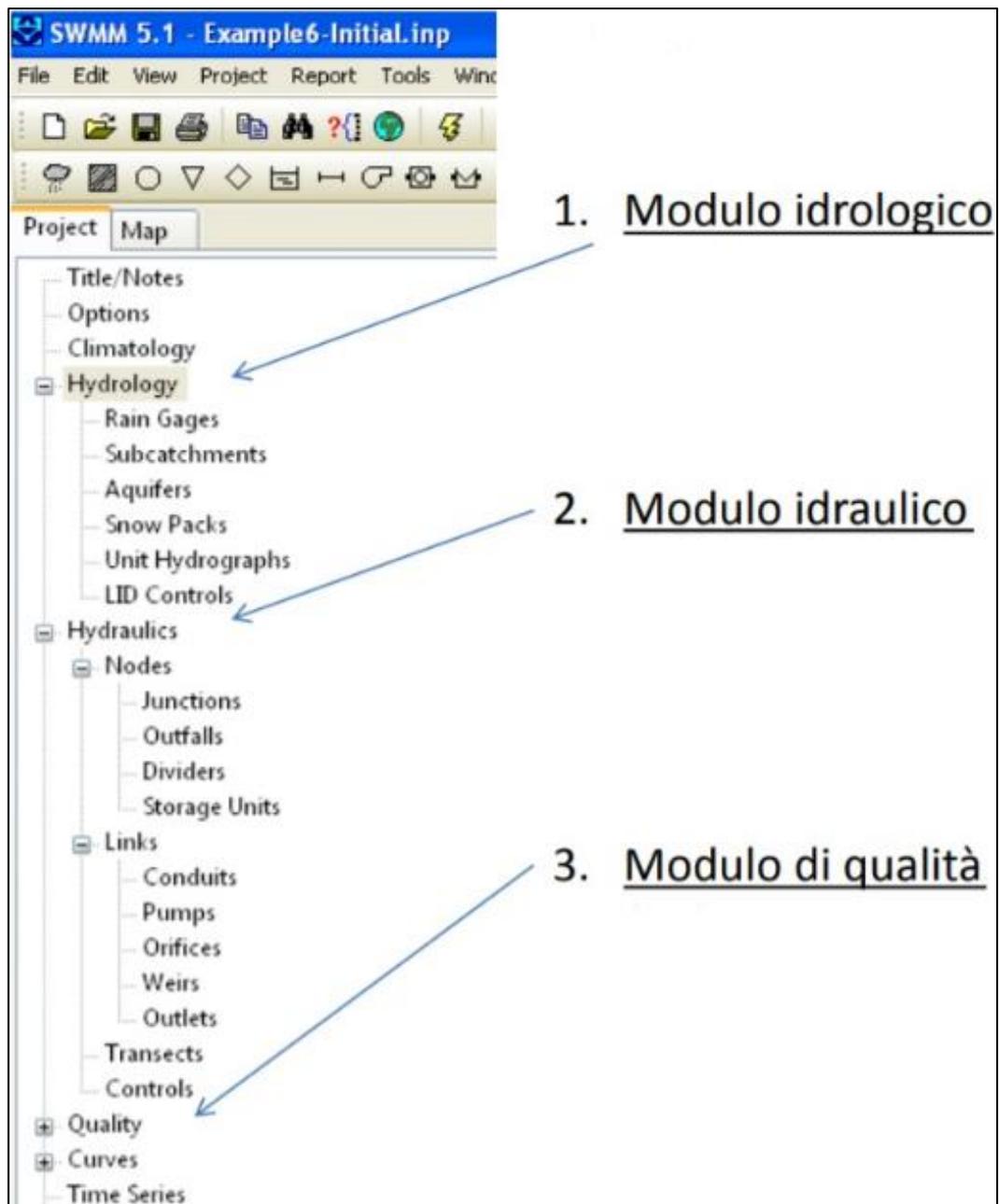


Figura 37: I moduli di SWMM (Bruno R., 2007).

3.4.1 Modulo idrologico (*Hydrology*)

Il modulo idrologico stima le portate prodotte da un determinato evento di precipitazione e descrive il territorio come un mosaico di sottobacini ciascuno dei quali ha una caratterizzazione dimensionale e funzionale. Al suo interno si trovano i seguenti comandi:

- Pluviometri (*Rain Gages*) : forniscono le informazioni relative all'intensità delle precipitazioni, in funzione del tempo, sui bacini. Tali dati possono essere inseriti manualmente sottoforma di serie temporali attraverso appositi editor, oppure caricati da un file di testo esterno. Le principali proprietà in input comprendono informazioni riguardanti: l'intensità o il volume della pioggia e anche l'intervallo di registrazione dei dati (ogni ora, 30 minuti, 15 minuti, ecc).
- Sottobacini (*Subcatchments*) : costituiscono delle porzioni di territorio che intercettano le precipitazioni e generano il deflusso che volge verso un punto di uscita. È possibile aggiungere n sottobacini disegnando n poligoni con il mouse sulla mappa e, poi, per ogni sottobacino sarà l'utente a decidere il punto di uscita di ogni area, che può essere un nodo del sistema di drenaggio o un sottobacino adiacente. Ciascun *subcatchment* viene suddiviso in porzioni permeabili e impermeabili, in cui il deflusso potrà o meno infiltrarsi. L'infiltrazione può essere tenuta in conto adottando uno tra i metodi di calcolo suggeriti: *Horton*, *Horton* modificato, *Green-Ampt*, *Green-Ampt* modificato e il *Curve Number*. Le proprietà fondamentali che l'utente deve assegnare ai sottobacini, per definire integralmente il sottobacino stesso, sono: la precipitazione a cui esso è soggetto (*Rain Gage*), i nodi del sistema di drenaggio che ricevono afflusso da esso (*Outlet*), l'area espressa in ettari (*Area*), la larghezza equivalente del sottobacino (*Width*), impermeabilità (*%Zero-Imperv*), pendenza media della superficie (*%Slope*), numero di Manning sia per la parte impermeabile (*N-Imperv*) che per quella permeabile (*N-Perv*) e il *depression storage* sia per la parte impermeabile (*Dstore-Imperv*) che per quella permeabile (*Dstore-Perv*). Inoltre, esiste

anche un apposito editor di gruppo che permette di impostare lo stesso evento di pioggia a tutti i sottobacini dell'area di lavoro.

- Acquiferi (*Aquifers*): sono un'area del sottosuolo che ricevono le infiltrazioni dal sottobacino sopra di essi e scambiano il flusso delle acque sotterranee con un nodo del sistema di trasporto.
- Accumulo di neve (*Snow Packs*): è la neve accumulata che copre un sottobacino.
- Unità idrografiche (*Unit Hydrographs*): sono una funzione di risposta che descrivono la quantità di afflusso/infiltrazione di fognature generata nel tempo per unità di pioggia istantanea.
- Controlli LID (*LID Controls*): l'acronimo LID sta per *low-impact development* (sviluppo a basso impatto). Rappresentano l'insieme di strategie e tecniche adottate nella gestione sostenibile delle acque meteoriche. Il loro scopo è quello di controllare le acque di pioggia tramite tecnologie a basso impatto che imitano i normali processi naturali e che mirano al mantenimento del regime idrico presente prima dell'urbanizzazione. Tra le varie tecnologie utilizzate per ridurre il deflusso superficiale attraverso una maggiore infiltrazione vi sono: le aree di bioretensione, le pavimentazioni porose o i ricoprimenti vegetativi, i sistemi di trincea, ecc. .

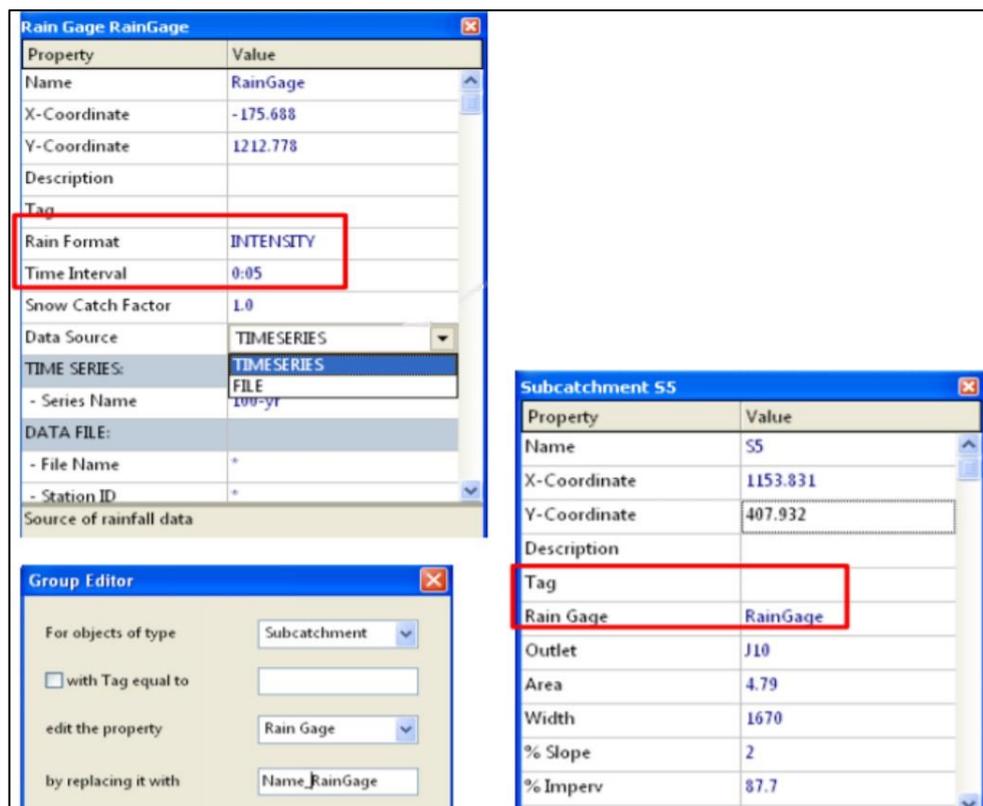


Figura 38: Gli editor del software SWMM (Bruno R., 2007).

3.4.2 Modulo idraulico (Hydraulics)

Il modulo idraulico contiene un set flessibile di comandi che permettono di realizzare la modellazione idraulica del sistema di drenaggio. È utilizzato per incanalare le portate (bianche o nere) attraverso una rete idraulica costituita da: tubazioni, canali a pelo libero, vasche, sfioratori, unità di stoccaggio/trattamento e strutture di diversione.

Il programma *SWMM* utilizza una schematizzazione di **collegamenti** (o **rami**) e **nodi** per rappresentare la rete di scolo delle acque, favorendo così la riproduzione discreta del modello fisico e la soluzione matematica delle equazioni di *De Saint Venant* che sono le basi matematiche del modello e del blocco *Extran*.

La rete di drenaggio è idealizzata come una successione di rami, ciascuno dei quali ha una determinata geometria, che si collegano tra loro in corrispondenza dei nodi. Le proprietà costanti associate ai collegamenti sono: il tipo di sezione, la lunghezza, la pendenza e la scabrezza; quelle ottenute ad ogni passo di calcolo sono invece: la portata, la velocità, l'area bagnata, il raggio idraulico e la larghezza del pelo libero. Le ultime tre sono in funzione del livello idrico istantaneo.

La variabile indipendente fondamentale nei collegamenti che si assume costante in ogni passo di calcolo è la portata Q . La velocità e l'area bagnata del flusso, o il livello, sono invece grandezze variabili nello stesso.

Le proprietà costanti e associate ai nodi sono: la quota di scorrimento e la quota di immissione (o emissione) del collegamento rispetto al fondo; quelle ottenute ad ogni passo di calcolo e funzione del livello idrico nel nodo sono: il volume, l'area superficiale libera e il carico idraulico totale H .

La variabile indipendente fondamentale nei nodi, variabile nel tempo ma costante nel singolo nodo durante un passo di calcolo, è il carico idraulico totale. La variazione di volume nel nodo durante un certo passo di calcolo costituisce la base per i calcoli seguenti di portata e di carico idraulico totale.

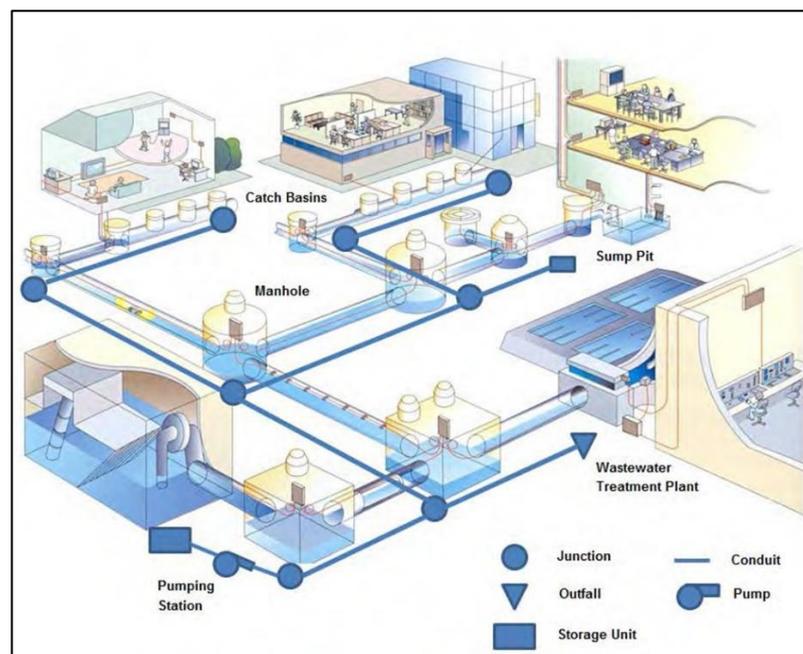


Figura 39: Rappresentazione nodo-collegamento di un sistema fognario (EPA SWMM, 2015).

3.4.2.1 I nodi

I Nodi (*Nodes*) rappresentano la confluenza dei canali superficiali o, nel caso si adottasse il programma per sistemi fognari, dei pozzetti (giunzioni, bocche di scarico, deviatori di flusso, unità di stoccaggio). È possibile aggiungere i nodi di connessione semplicemente posizionandoli con il mouse sulla mappa. I principali parametri di input per definire un nodo sono:

- la quota dal fondo (*Invert Elevation*);
- la quota del terreno;
- gli eventuali afflussi in ingresso dall'esterno (*Inflows*);
- l'area inondata durante l'allagamento (*Ponded Area*).

Gli elementi che fanno parte della voce “**nodi**” sono i seguenti:

- **Giunzioni** (*Junctions*)  : sono i punti in cui i “*links*” (tubazioni, condotte e canali) si uniscono tra loro con un volume di stoccaggio trascurabile.
- **Bocche di scarico** (*Outfalls*)  : rappresentano i nodi terminali della rete dai quali l'acqua viene scaricata e convogliata in un corpo recettore con elevazione della superficie dell'acqua nota. Al contrario delle giunzioni gli *outfalls* possono essere collegati ad una sola condotta.
- **Deviatori di flusso** (*Dividers*)  : sono elementi, del sistema di trasporto, che consentono di dividere la portata in due condotti distinti. Possono avere al più due elementi collegati sul lato di scarico. Questi particolari nodi vengono considerati tali solo nel caso del modello dell'onda cinematica con flusso costante mentre vengono ridotti a delle semplici giunzioni nel caso del modello dell'onda dinamica. In base a come vengono deviati gli afflussi, esistono quattro diversi tipi di deviatori di flusso: *cutoff divider*, *tabular divider*, *overflow divider* e *weir divider*. La portata che viene deviata attraverso i deviatori di flusso è calcolata con la seguente relazione:

$$Q_{div} = C_w \cdot \left(\frac{Q_{in} - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \cdot H_w \right)^{1,5} \quad (3.1)$$

dove: C_w è il coefficiente di sbarramento, Q_{in} è la portata entrante nel deviatore, Q_{min} è il valore di portata per cui inizia la separazione, H_w è l'altezza di sbarramento e Q_{max} è il valore di portata massima, calcolata come:

$$Q_{max} = C_w \cdot H_w^{1,5} \quad (3.2)$$

- **Unità di Stoccaggio (Storage Units)**  : sono nodi del sistema di drenaggio che garantiscono un volume di accumulo (stagni, laghi, ecc.). Possono riprodurre sia delle strutture di stoccaggio molto piccole che molto grandi. Oltre a consentire l'entrata e lo scarico dell'acqua, essi considerano anche l'evaporazione superficiale e l'infiltrazione nel suolo.

3.4.2.2 I collegamenti o rami

I Collegamenti (Links) sono elementi che permettono il transito dell'acqua da un nodo all'altro del sistema. Ogni ramo è schematizzato come un condotto con caratteristiche costanti di forma, lunghezza, pendenza, scabrezza, ecc. La forma del canale può essere scelta utilizzando un apposito menù del programma (figura 39), grazie al quale è possibile selezionare una serie di sezioni di formati standard. Inoltre, sono da specificare il nodo di entrata (*Inlet Offset*) e di uscita (*Outlet Offset*) della condotta.

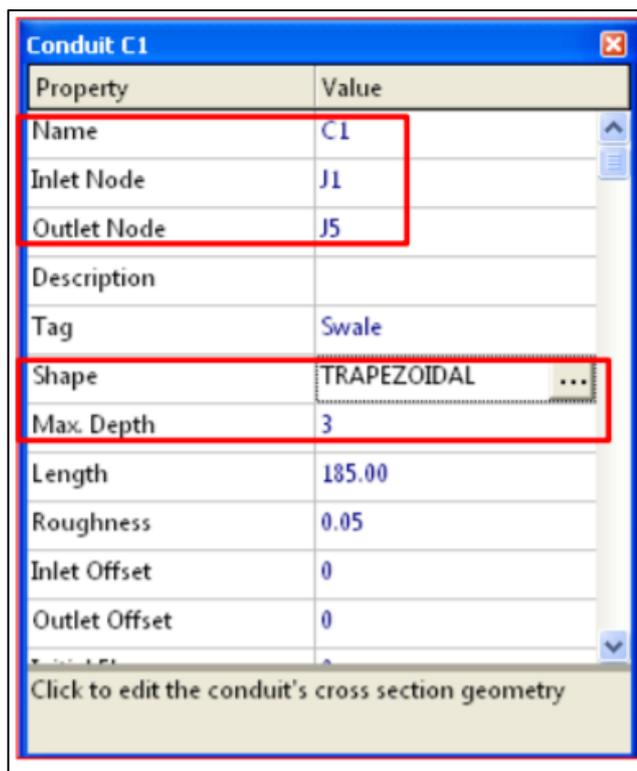


Figura 40: L'editor dei links in SWMM (Bruno R., 2007).

Gli elementi che fanno parte della voce “**collegamenti**” sono i seguenti:

- **Condotte (Conduits)** : sono dei tubi o canali che trasportano l'acqua da un nodo a un altro del sistema di trasporto. Possono avere forme diverse: rettangolare, trapezoidale, triangolare, circolare, ellittica, ad arco, parabolica, a ferro di cavallo, irregolare, ecc. (figura 41). Solitamente, la maggior parte dei tubi di drenaggio sono di forma circolare e i canali di scolo hanno tradizionalmente geometrie ellittiche o ad arco.

Per il calcolo della portata nei condotti, il programma *SWMM* si serve dell'equazione di *Manning*:

$$Q = \frac{1,49}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (3.3)$$

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

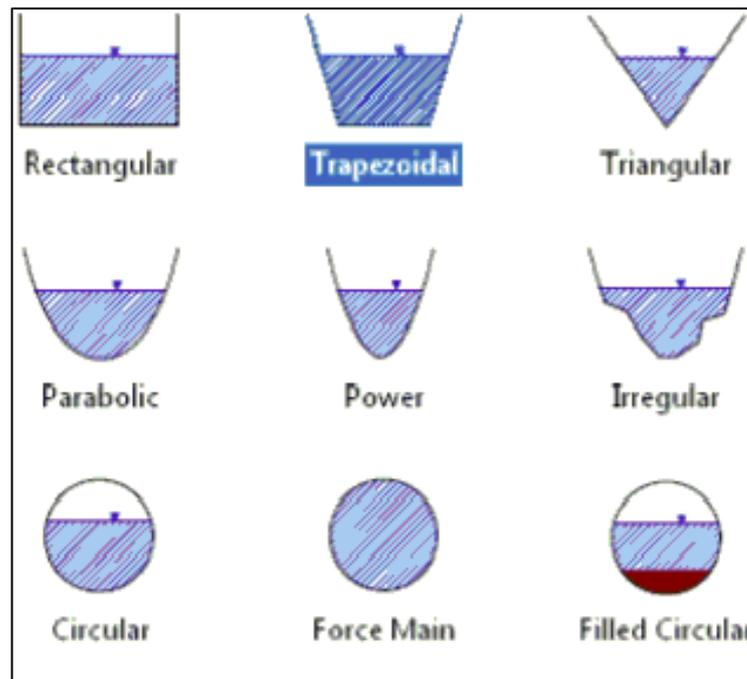


Figura 41: La geometria delle condotte (EPA SWMM, 2015).

- **Pompe (Pumps)** : sono degli impianti adottati per sollevare l'acqua a quote più elevate. Infatti, può capitare che non sia possibile, per diverse ragioni, costruire delle fognature che funzionino a gravità. Il software *SWMM* supporta cinque diversi tipi di funzionamento della pompa.
- **Orifici (Orifices)** : sono sistemi che hanno il compito di modellare le strutture di scarico e di deviazione nei sistemi di drenaggio dirigendo e regolando il flusso tra due nodi del sistema di trasporto. Nel programma, essi, fungono da collegamento tra due nodi e possono avere forma rettangolare o circolare ed essere posizionati in basso o a lato del nodo a

monte. La portata attraverso un orifizio che risulta essere completamente aperto viene calcolata come:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3.4)$$

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

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

- **Uscite (Outlets)** : sono dei dispositivi che controllano la portata uscente dai serbatoi di accumulo, dotati in alcuni casi di una valvola di non ritorno, per confinare il flusso in una sola direzione. Nel software vengono rappresentati come collegamenti tra due nodi.

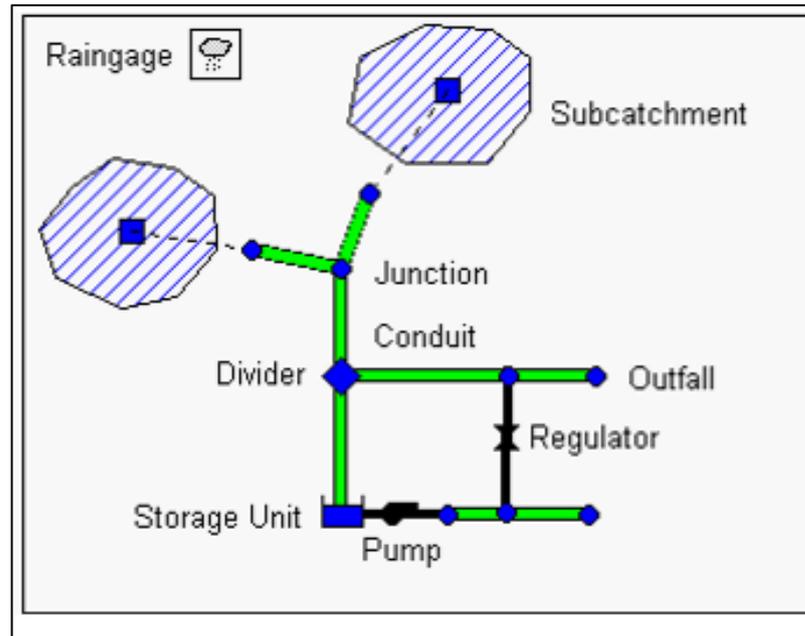


Figura 42: Il modello concettuale di SWMM di un sistema di drenaggio delle acque piovane (EPA SWMM, 2015).

3.4.3 Modulo qualità (Quality)

Il modulo qualità definisce uno o più inquinanti presenti nei sottobacini, classificandoli alla classe di suolo di appartenenza, valutandone l'origine e la propagazione lungo la rete. Tale modulo presenta due comandi principali:

- il comando **Inquinanti** (*Pollutants*): con il quale il software *SWMM* riesce a simulare l'origine e il percorso intrapreso lungo la rete da ogni inquinante che si può accumulare ed essere allontanato dalla superficie del sottobacino o essere introdotto direttamente nel sistema di trasporto. Per la loro definizione è opportuno stabilire l'unità di misura, la concentrazione nelle piogge, nelle acque superficiali e in quelle sotterranee. L'accumulo e il dilavamento di inquinanti sono funzione degli usi del suolo.
- il comando **Usi del suolo** (*Land Uses*): con il quale si è in grado di fornire determinate caratteristiche ai sottobacini. Inoltre, con questo comando si possono caratterizzare le funzioni che descrivono l'accumulo e il lavaggio

di sostanze inquinanti nei vari sottobacini. Alcuni esempi sono i suoli residenziali, commerciali, industriali e non sviluppati.

3.5 Opzioni di simulazione

Dopo che un'area di studio è stata opportunamente descritta è possibile simulare la sua risposta al deflusso, al flusso e al comportamento della qualità dell'acqua. Il software ha una serie di opzioni che controllano il modo in cui viene eseguita la simulazione. I processi fisici, che compaiono durante il ciclo idrologico, si possono modellare impostando determinate opzioni di simulazione (*Simulation Options*). Tra le varie categorie di opzioni che si possono settare dal menù a tendina (figura 43) vi sono quelle:

- **Generali** (*General*): in cui si impostano i valori per le seguenti opzioni: modello di processo (*Process Models*), modello d'infiltrazione (*Infiltration Model*) e modello di propagazione (*Routing Model*);
- **Date** (*Dates*): in cui si impostano la data e l'ora di inizio e fine della simulazione nonché la data e l'ora del giorno in cui deve iniziare il report dei risultati della simulazione.
- **Intervalli di tempo** (*Time Steps*): in cui viene scelta la lunghezza delle fasi temporali utilizzate per il calcolo del deflusso, il calcolo della propagazione e la comunicazione dei risultati. I passi temporali sono specificati in giorni, ore, minuti e secondi;
- **Onda dinamica** (*Dynamic Wave*): imposta diversi parametri che controllano il modo in cui vengono eseguiti i calcoli della propagazione del flusso dell'onda dinamica. Questi parametri non hanno alcun effetto per gli altri metodi di propagazione del flusso.
- **File** (*Files*): viene utilizzata per specificare quali file di interfaccia verranno utilizzati o salvati durante la simulazione.

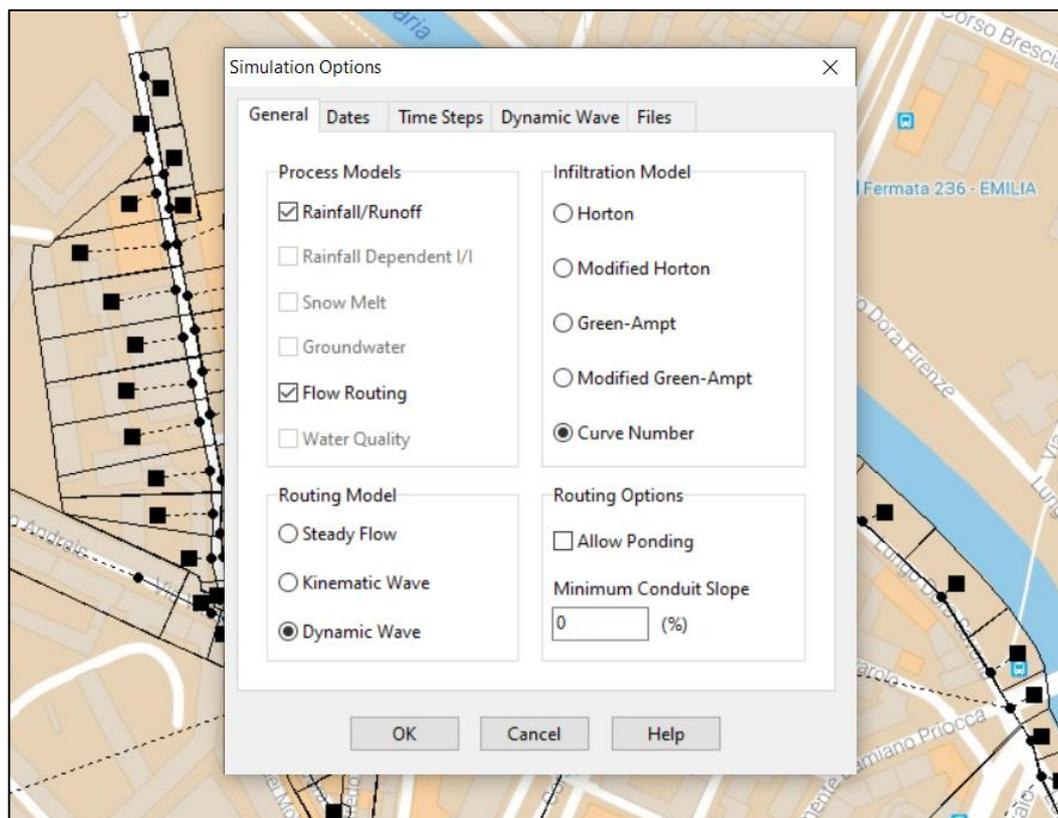


Figura 43: Opzioni di simulazione di SWMM (Boano F., Losero S., Ridolfi L., 2017).

In questa sezione vengono brevemente descritti i modelli utilizzati da SWMM per modellare le acque meteoriche attraverso i seguenti processi fisici:

- Deflusso superficiale (*Runoff*);
- Infiltrazione (*Infiltration*);
- Onda dinamica (*Dynamic wave*).

3.5.1 Deflusso superficiale

Il software di calcolo *SWMM* per convertire l'eccesso di precipitazioni (pioggia e/o fusione di neve meno infiltrazione, evaporazione e astrazione iniziale) in deflusso superficiale (flusso via terra) su un sottobacino utilizza un modello di serbatoio non lineare.

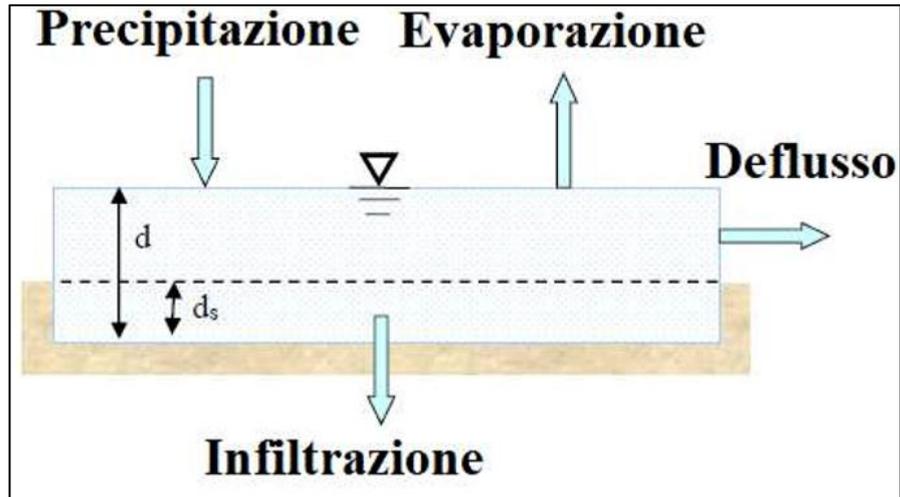


Figura 44: Modello di serbatoio non lineare di un sottobacino nel software SWMM (EPA SWMM, 2016).

Il volume di questo serbatoio è rappresentato dalla massima capacità di immagazzinamento delle depressioni, ossia quel volume d'acqua intercettata da avvallamenti, sconessioni delle superfici e ristagni.

In questa schematizzazione, il sottobacino è soggetto agli afflussi di precipitazione (pioggia e scioglimento delle nevi) e alle perdite dovute all'evaporazione, all'infiltrazione e al deflusso superficiale.

Nel modello un sottobacino viene schematizzato come una superficie rettangolare, con una pendenza uniforme S e una larghezza W , che drena l'acqua superficiale attraverso un singolo canale di uscita (figura 43).

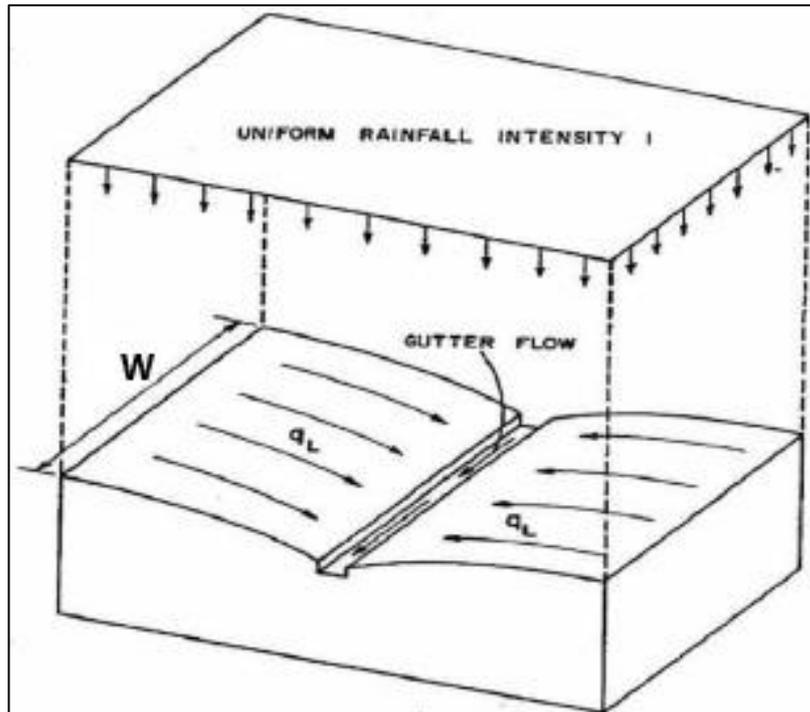


Figura 45: Rappresentazione concettuale di un sottobacino (EPA SWMM, 2016).

Nel serbatoio di figura 44, il deflusso superficiale per unità di superficie, q_L , si verifica solo quando il livello dell'acqua d supera il limite massimo di depressione d_s . Per il calcolo del deflusso superficiale per unità di superficie si può adottare l'equazione di *Manning*, nell'ipotesi che esso si comporti come una portata uniforme che scorre all'interno di un canale rettangolare con pendenza S :

$$q_L = \frac{1,49}{n} \cdot \frac{W}{A} \cdot (d - d_s)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (3.5)$$

La profondità dell'acqua sul sottobacino d viene continuamente aggiornata nel tempo risolvendo numericamente l'equazione del bilancio idrico sul sottobacino. Infatti, dalla conservazione della massa, la variazione netta di profondità d per unità di tempo t è semplicemente la differenza tra i tassi di afflusso e di deflusso rispetto al sottobacino:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q_L \quad (3.6)$$

dove:

- i è la quantità di pioggia + scioglimento della neve (ft/s);
- e è il tasso di evaporazione della superficie (ft/s);
- f è il tasso di infiltrazione (ft/s);
- q_L è il deflusso superficiale(ft/s).

Sostituendo la relazione (3.5) nella (3.6) si ottiene:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha \cdot (d - d_s)^{5/3} \quad (3.7)$$

Dove α è definito come:

$$\alpha = \frac{1,49}{n} \cdot \frac{W}{A} \cdot S^{1/2} \quad (3.8)$$

La relazione (3.7) è un'equazione differenziale ordinaria non lineare, la quale noti i valori di: i, e, f, α e d_s può essere risolta numericamente per ogni intervallo di tempo ricavando l'incognita d . Una volta che d è nota, i valori del deflusso superficiale per unità di superficie si possono ottenere dall'equazione (3.5). Si noti che l'equazione (3.6) si applica solo quando $d > d_s$. Quando $d \leq d_s$, il deflusso q_L è zero e il bilancio di massa su d diventa semplicemente:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f \quad (3.9)$$

3.5.1.1 Partizionamento del sottobacino

L'equazione (3.7), utilizzata per generare il deflusso superficiale, è stata sviluppata sulla base di un'area di sottobacino rettangolare idealizzata con proprietà uniformi. Nella realtà, però, le aree urbane non hanno tali proprietà; difatti le aree urbane contengono un mix di tipologie di superfici del terreno che possono essere comodamente suddivise in due categorie primarie: superfici permeabili (*Pervious*), come prati, campi e aree boschive, che consentono alle precipitazioni di infiltrarsi nel terreno e superfici impermeabili (*Impervious*), come tetti, strade e parcheggi, su

cui non si verifica alcuna infiltrazione. Pertanto, *SWMM* consente a ogni sottobacino di avere sia una sottozona permeabile che impermeabile su cui viene risolta l'equazione (3.7) attraverso la definizione, da parte dell'utente, del parametro “*Percentuale di impermeabilità*”. Esso consente di determinare la quantità di sottobacino totale dedicata a ogni tipo di superficie.

Inoltre, non è raro che le superfici impermeabili inizino a generare deflusso quasi immediatamente dopo che si è verificato un evento di pioggia, ben prima che la profondità di stoccaggio della depressione si riempia. Per modellare tale comportamento, *SWMM* consente di dividere ulteriormente l'area impermeabile di un sottobacino in due sottozone: una che accumula l'acqua e l'altra che favorisce il deflusso. Pertanto, nel complesso, un sottobacino può contenere tre tipi di sottozone (figura 46). Si può notare che, in base a queste definizioni, tutta l'area impermeabile è direttamente collegata al punto di uscita del sottobacino (in genere un tubo di drenaggio o un canale).

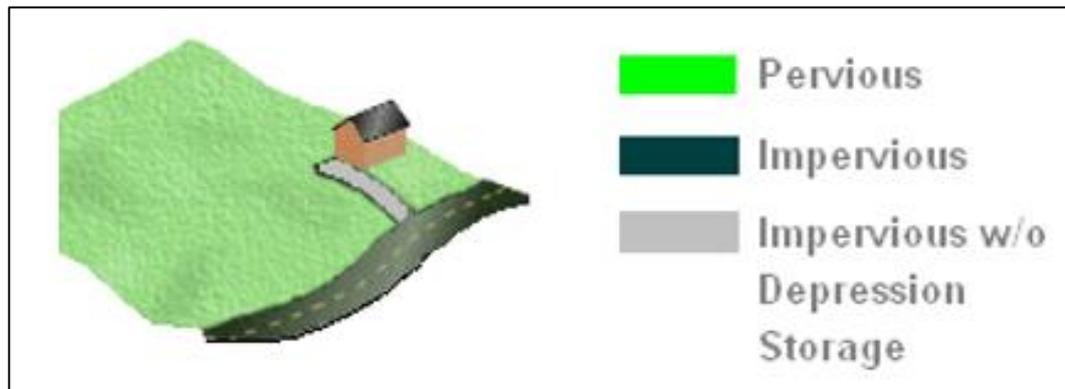


Figura 46: Tipi di sottozone all'interno di un sottobacino (EPA SWMM, 2016).

Le tre sotto-aree sono incorporate nel sottobacino idealizzato (figura 47). Ovviamente, nella realtà le tre aree non si allineeranno in questo modo e tantomeno saranno necessariamente compatte e connesse.

La disposizione qui usata, infatti, è solo una comodità di modellazione. I simboli A1, A2 e A3 si riferiscono alla sottozona permeabile e a due tipi di sottozone impermeabili (rispettivamente con e senza accumulo dell'acqua).

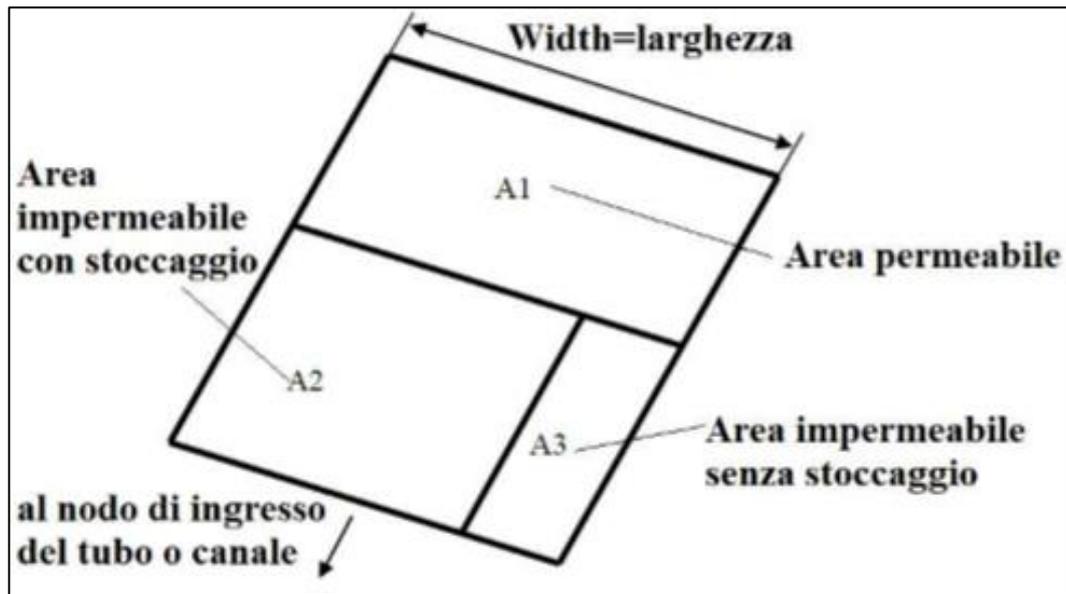


Figura 47: Partizionamento idealizzato del sottobacino per il deflusso superficiale (EPA SWMM, 2016).

Con tale precisazione l'equazione differenziale (3.7) viene risolta singolarmente per ogni sottozona e, alla fine di ogni istante di tempo, le portate prodotte da ogni sotto-area vengono combinate insieme per determinare il deflusso totale del sottobacino.

3.5.2 Infiltrazione (Infiltration)

L'infiltrazione è il processo attraverso il quale la pioggia penetra nella superficie del terreno, riempiendo i pori degli strati sottostanti (Akan e Houghtalen, 2003). Spesso rappresenta la maggior parte delle perdite di precipitazione sulle aree permeabili. Teoricamente, l'infiltrazione è governata dall'equazione differenziale di Richards (Richards, 1931), che mette in relazione la permeabilità del suolo con la tensione dell'acqua dei pori in funzione del contenuto di umidità del suolo. La difficoltà di risolvere questa equazione differenziale parziale altamente non lineare, lo rende inadatto all'uso in un modello come *SWMM*, soprattutto per le simulazioni continue a lungo termine.

Gli ingegneri hanno sviluppato diversi modelli di infiltrazione algebrica, più semplici e capaci di catturare la dipendenza generale della capacità dell'infiltrazione sulle caratteristiche del suolo e il volume di acqua precedentemente infiltrata nel corso di un evento temporalesco. Dal momento che, non esiste un accordo universale su quale modello sia il migliore, *SWMM* consente all'utente di scegliere tra cinque dei metodi più utilizzati: il metodo di *Horton*, il metodo di *Horton* modificato, il metodo *Green-Ampt*, il metodo di *Green-Ampt* modificato, il metodo del *Curve Number*.

A prescindere da quale metodo di infiltrazione si utilizzi, i parametri che definiscono il metodo dipendono fortemente dal tipo di terreno e dalle condizioni dello stesso da infiltrare.

Il *NRCS* (*Natural Resources Conservation Service*, precedentemente *Soil Conservation Service* o *SCS*) ha classificato la maggior parte dei suoli in gruppi idrologici: A, B, C e D, e a seconda della loro capacità d'infiltrazione. I terreni sabbiosi ben drenati ricadono nel gruppo "A"; i terreni argillosi scarsamente drenati rientrano nel gruppo "D", (vedi tabella 5).

Tabella 5: Significati dei gruppi idrici del suolo (NRCS., 2009)

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

3.5.2.1 Il metodo di Horton

Il metodo di *Horton* è di natura empirica e probabilmente il più noto. Nella sua forma abituale è applicabile solo agli eventi per i quali l'intensità delle precipitazioni supera sempre la capacità di filtrazione; tuttavia, la forma modificata di questo modello, utilizzata in *SWMM*, permette di superare questa limitazione.

Siccome il metodo di *Horton* si basa su osservazioni empiriche, le quali dimostrano che l'infiltrazione nel caso di una precipitazione sufficientemente prolungata diminuisce esponenzialmente da un tasso iniziale massimo ad un tasso

minimo, allora lo stesso *Horton* propose la seguente equazione esponenziale per prevedere la riduzione della capacità di infiltrazione nel tempo – come osservato dalle misurazioni sul campo:

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \cdot e^{-k_d \cdot t} \quad (3.10)$$

dove:

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

3.5.2.2 Il metodo di Horton modificato

Akan sviluppò una versione modificata del metodo di infiltrazione di *Horton* (*Akan, 1992; Akan e Houghtalen, 2003*) che è stato aggiunto come opzione di infiltrazione separata in *SWMM 5*. Il metodo utilizza gli stessi parametri del metodo originale ma, invece di tenere traccia del tempo lungo la curva di decadimento di *Horton*, utilizza il volume cumulativo di infiltrazione superiore al tasso minimo di infiltrazione come variabile di stato.

Si presume, quindi, che parte dell'acqua infiltrata percola più in profondità nel terreno al tasso di infiltrazione minimo (comunemente preso come conducibilità idraulica satura del suolo). Di conseguenza, è la differenza tra i tassi di infiltrazione effettivi e minimi che si accumulano appena sotto la superficie che provocano la capacità di infiltrazione per diminuire col tempo. Questo metodo è richiesto per dare stime di infiltrazione più accurate quando si verificano intensità di precipitazioni basse. Il metodo modificato ha la stessa equazione di decadimento esponenziale del metodo di *Horton* originale:

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \cdot e^{-k_d \cdot t} \quad (3.11)$$

3.5.2.3 Il metodo Green-Ampt

Il metodo di *Green-Ampt* (*Green e Ampt, 1911*) ha ricevuto notevole attenzione negli ultimi anni. Il suo schema concettuale è ben rappresentato nella figura 48. Il modello suppone che il processo di infiltrazione inizi quando si accumula un certo strato d'acqua di altezza h_0 .

Nello stato iniziale questo velo d'acqua coincide con la superficie del terreno mentre, successivamente, esso avanza nel sottosuolo muovendosi lungo la verticale e mantenendo giacitura invariata. Ciò perché si suppone che l'infiltrazione avvenga per traiettorie liquide verticali e con vettore velocità d'infiltrazione invariante nello spazio.

Nella zona bagnata il contenuto di umidità ϑ è a saturazione ϑ_s mentre al passaggio del fronte bagnante, il contenuto di umidità assume un determinato livello noto, pari a ϑ_i .

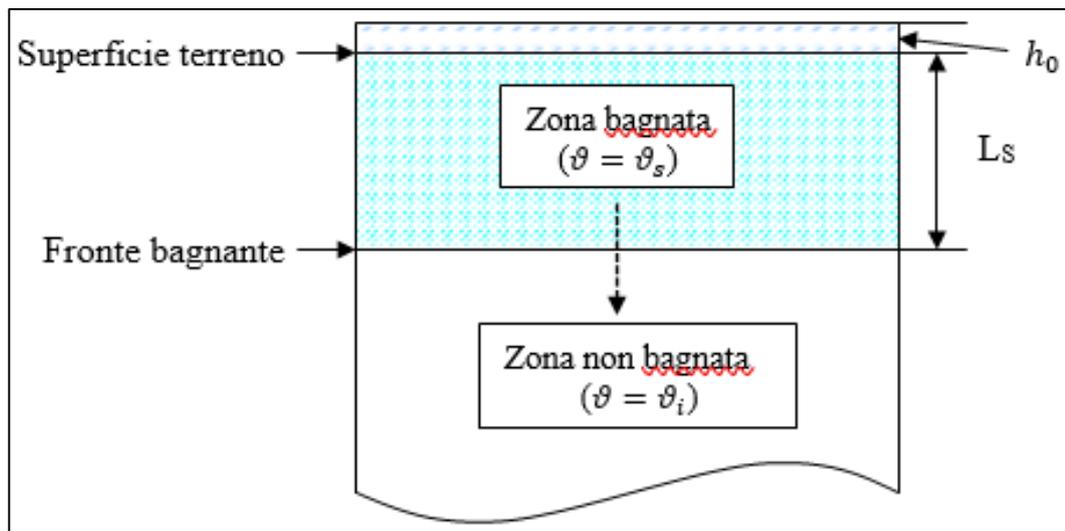


Figura 48: Rappresentazione schematica del modello di infiltrazione di Green – Ampt (EPA SWMM, 2016).

La velocità dell'acqua all'interno della zona bagnata è data dalla Legge di Darcy in funzione della: conducibilità idraulica K_s , tensione capillare lungo il fronte bagnante ψ_s , profondità dell'acqua dalla superficie d e profondità dello strato

saturo dalla superficie L_s . La capacità di infiltrazione nel suolo f_p secondo il metodo *Green-Ampt* è data dalla seguente relazione:

$$f_p = K_s \cdot \left[\frac{d + L_s + \psi_s}{L_s} \right] \quad (3.12)$$

3.5.2.4 Il metodo del Curve Number

Il metodo del *Curve Number* (CN) è stato proposto dal *SCS* (*Soil Conservation Service*, ampiamente noto come *NRCS - Natural Resource Conservation Service*) per determinare la quantità di precipitazione che penetra nel terreno a partire dalla conoscenza della pioggia totale e dagli usi del suolo.

Il metodo si basa sull'ipotesi che sia sempre valida la seguente relazione di proporzionalità:

$$\frac{V}{P_n} = \frac{W}{S_{max}} \quad (3.13)$$

dove:

- V è il volume di deflusso;
- P_n è la precipitazione netta;
- W è il volume d'invaso, ossia il volume idrico effettivamente immagazzinato;
- S_{max} è la capacità di stoccaggio idrica del suolo o volume specifico di saturazione (differenza di volume d'acqua tra un terreno completamente saturo e uno completamente drenato).

La precipitazione netta (3.14) si ottiene sottraendo alla precipitazione totale le perdite iniziali dovute all'immagazzinamento superficiale, imputabile all'intercettazione operata dalla copertura vegetale, dalle asperità del terreno e dall'infiltrazione prima della formazione del deflusso:

$$P_n = P - I_a \quad (3.14)$$

dove:

- P_n è la precipitazione netta;
- P è la precipitazione totale;
- I_a sono le perdite iniziali.

La precipitazione netta, inoltre, si ripartisce completamente tra il volume di deflusso:

$$P_n = V + W \quad (3.15)$$

Sostituendo il valore di W ricavato dalla (3.15) nella (3.13), si ottiene la relazione che permette di correlare il deflusso totale V alla precipitazione netta P_n (Haan et al., 1994; McCuen, 1998; Bedient et al., 2013; NRCS, 2004b):

$$V = \frac{P_n^2}{P_n + S_{max}} \quad (3.16)$$

Il termine di accumulo I_a , che rappresenta il volume di pioggia perduto, risulta di difficile calcolo. Per ovviare a ciò si usa, solitamente, esprimerlo in una relazione che lo correla alla capacità di stoccaggio idrica sul suolo S_{max} :

$$I_a = 0.2 \cdot S_{max} \quad (3.17)$$

Introducendo tale relazione nella (3.14) si ottiene:

$$P_n = P - 0.2 \cdot S_{max} \quad (3.18)$$

Sostituendo la (3.17) nella (3.16) si ha che:

$$V = \frac{(P - 0.2 \cdot S_{max})^2}{P + 0.8 \cdot S_{max}} \quad (3.19)$$

Il volume specifico di saturazione è ricavabile a partire da una tabella che contiene appunto i valori del CN (Curve Number), che variano in base alla tipologia di terreno e alle condizioni antecedenti l'evento:

$$S_{max} = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.20)$$

Il parametro CN è un numero il cui valore è compreso tra 0, suolo completamente permeabile, e 100, suolo totalmente impermeabile. Il CN rappresenta l'attitudine del bacino esaminato a produrre deflusso ed è essenzialmente legato a:

- natura litologica del suolo;
- tipo di copertura (uso del suolo);
- condizioni iniziali di umidità del suolo antecedenti un evento meteorico;
- stagione di riposo o crescita della vegetazione.

Dunque, la determinazione di tale parametro presuppone la conoscenza del gruppo idrologico di ciascun suolo appartenente al bacino in esame. Nel 1972, il *Soil Conservation Service* ha fornito alcune tabelle per facilitare la determinazione del parametro CN. Innanzitutto, ha suddiviso il suolo in quattro classi in base alla capacità di assorbimento. Pertanto, si avranno:

Gruppo A: il gruppo è costituito da suoli con un basso potenziale di deflusso e un alto tasso di infiltrazione quando sono completamente umidi; questi suoli sono costituiti normalmente da sabbie e ghiaie e usualmente vi vengono incluse anche sabbie limose e limi sabbiosi; tali terreni hanno una trasmissività maggiore di 0,76 cm/h;

Gruppo B: i suoli che fanno parte di questo gruppo hanno un moderato tasso di infiltrazione quando sono completamente bagnati e consistono prevalentemente in terreni da poco profondi a profondi, poco o molto drenati, con tessitura da fine a grossolana; generalmente sono inclusi in questo gruppo i limi e i limi siltosi; tali suoli hanno una trasmissività compresa tra 0,38 e 0,76 cm/h;

Gruppo C: i suoli di questo gruppo hanno un basso tasso di infiltrazione quando sono completamente bagnati e consistono maggiormente in suoli con uno strato che limita il movimento verso il basso dell'acqua e suoli con una tessitura da

moderatamente fine a fine; sono normalmente incluse in questo gruppo le argille sabbiose e limose; questi suoli hanno una trasmissività che va da 0,13 a 0,38 cm/h;

Gruppo D: i suoli di questo gruppo sono dotati di un elevato potenziale di deflusso; hanno un tasso di infiltrazione molto basso e consistono maggiormente in argille con elevato potere di ritenzione idrica, terreni con una quota della falda freatica prossima a quella della superficie del terreno, suoli con uno strato argilloso vicino alla superficie e suoli poco profondi che poggiano su uno strato impermeabile; sono inclusi in questo gruppo argille limose, argille siltoso-limose, argille siltose, argille ed argille sabbiose; questi suoli hanno una trasmissività molto bassa che va da 0 a 0,13 cm/h; alcuni suoli vengono classificati in questo gruppo a causa di eventuali problemi di drenaggio, ma qualora tali problemi dovessero sparire questi suoli cambierebbero gruppo.

Una volta determinata la classe del suolo di appartenenza, si procede all'interno del bacino in studio per l'individuazione di aree omogenee per destinazione d'uso e sistemazione; a ciascuna di queste superfici viene in seguito attribuito il corrispettivo e più appropriato valore di CN, dedotto dai valori riportati in tabelle.

Il valore di CN dell'intero bacino si ottiene come media pesata, con peso la superficie, dei valori stimati per le singole aree omogenee come suggerito da Mancini e Rosso (1989):

$$CN_{tot} = \frac{\sum_i (CN_i \cdot A_i)}{A_{tot}} \quad (3.21)$$

dove:

- CN_{tot} è il CN dell'intero bacino;
- CN_i è il CN della i-esima zona omogenea;
- A_i è l'area della i-esima zona omogenea;
- A_{tot} è l'area totale del bacino.

Le condizioni di saturazione del terreno sono fondamentali per la corretta valutazione della curva di frequenza delle portate al colmo. Difatti, a parità di precipitazione, le diverse condizioni del terreno incidono sulla risposta del bacino e sulla portata al colmo. Il metodo esprime lo stato di saturazione attraverso le condizioni di umidità del terreno antecedenti l'inizio dell'evento (*AMC*, *Antecedent Moisture Condition*).

L'*SCS* individua tre classi: *AMC I*, *AMC II* e *AMC III*, in relazione al valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei 5 giorni precedenti l'evento meteorico. L'attribuzione della classe *AMC* si basa sui criteri riportati nella tabella 6:

Tabella 6: Classi *AMC* in relazione al valore assunto dall'altezza di pioggia caduta (Madera V., 2019).

Classe <i>AMC</i>	Stagione di riposo	Stagione di crescita
I	< 12.7 mm	<35.5 mm
II	12.7-28.0 mm	35.5-53.3 mm
III	>28.0 mm	>53.3 mm

Per condizioni antecedenti l'evento molto umide, *AMC III*, o molto asciutte, *AMC I*, si possono derivare i relativi valori di *CN*, usando rispettivamente:

$$CN(I) = \frac{4.2 \cdot CN(II)}{10 - 0.058 \cdot CN(II)} \quad (3.22)$$

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0.13 \cdot CN(II)} \quad (3.23)$$

Si fa riferimento a un terreno in condizioni *AMC I* quando questo si presenta secco, pur senza raggiungere il punto di appassimento, e in cui le colture o la vegetazione sono ben sviluppate; una condizione *AMC III* si ha per un terreno saturo a causa di precipitazioni superiori a 50 mm di pioggia nei cinque giorni precedenti l'evento considerato, mentre per la stagione fredda si considerano precipitazioni superiori a 25 mm di pioggia nei cinque giorni antecedenti l'evento. Di seguito si

riporta una tabella contenete i valori del parametro CN nelle diverse condizioni di uso del suolo e gruppi idrologici, nelle condizioni di umidità *AMC II* (tabella 7).

Tabella 7: Valori del CN per differenti gruppi di terreno, nella condizione AMC(II) (elaborazione propria).

Descrizione dell'uso del terreno	Gruppo del suolo idrologico			
	A	B	C	D
Terreno coltivato				
Senza trattamento di conservazione	2	1	8	1
Con trattamento di conservazione	2	1	8	1
Pascolo				
Condizioni di salute	8	9	6	9
Buone condizioni	9	1	4	0
Prato				
Buone condizioni	0	8	1	8
Terreno in legno o foresta				
Stand sottile, scarsa copertura, senza pacciamatura	5	6	7	3
Buona copertura	5	5	0	7
Spazi aperti, prati, parchi, campi da golf, cimiteri, ecc.				

Buone condizioni: copertura erba su 75% o più della zona		9	1	4	0
Condizioni eque: copertura erba su 50 – 75% della superficie		9	9	9	4
Aree commerciali e commerciali (85% impermeabili)		9	2	4	5
Distretti industriali (72% impermeabili)		1	8	1	3
Residenziale					
Dimensione media del lotto	% media impermeabile				
1/8 ac o meno	65	7	5	0	2
1/4 ac	38	1	5	3	7
1/3 ac	30	7	2	1	6
1/2 ac	25	4	0	0	5
1 ac	20	1	8	9	4
Parcheggi pavimentati, tetti, vialetti, ecc.		8	8	8	8

Strade e strade				
Pavimentato con cordoli e fognature	8	8	8	8
Ghiaia	6	5	9	1
Sporcizia	2	2	7	9

3.5.2.5 Modello dell'onda dinamica

Il movimento dell'acqua attraverso una rete di drenaggio è regolato dalle equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine di *De Saint Venant* (equazione di continuità (3.24) e principio di conservazione della quantità di moto (3.25) per un flusso superficiale libero variabile e instabile:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + g \cdot A \cdot S_f = 0 \quad (3.25)$$

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

Si ipotizza che le grandezze che definiscono la corrente idrica (portata e livello) siano funzioni continue del tempo e della sola coordinata spaziale x . La corrente si può quindi considerare gradualmente variata con sezioni trasversali piane e verticali e pressione distribuita in maniera idrostatica.

L'analisi delle onde dinamiche risolve la forma completa delle equazioni (3.24) e (3.25) e, quindi, produce i risultati teoricamente più accurati. Può tenere conto dell'accumulo di canali, effetti di ristagno, perdite di ingresso/uscita, inversione di flusso e flusso pressurizzato. Poiché accoppia la soluzione per entrambi i livelli dell'acqua ai nodi e al flusso nelle condotte, può essere applicato a qualsiasi layout di rete generale, anche a quelli contenenti più deviazioni e circuiti a valle. È il metodo di scelta per i sistemi soggetti a un forte riflusso a causa di restrizioni di flusso a valle e con regolazione del flusso tramite sbarramenti e orifici. Questa generalità ha il prezzo di dover utilizzare piccoli passaggi temporali per mantenere la stabilità numerica.

La modellazione dinamica delle onde è stata introdotta per la prima volta nella versione 3 di *SWMM* nel 1981 come modulo di programma separato noto come *EXTRAN (Extended Transport)* (Roesner et al., 1983).

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

- il flusso è unidimensionale;
- la pressione è idrostatica;
- il coseno dell'angolo di inclinazione del letto del canale è vicino all'unità;
- l'attrito limite può essere rappresentato nello stesso modo del flusso costante.

La formula adottata per descrivere le perdite di carico per unità di lunghezza (cadente piezometrica) è definita attraverso l'equazione di *Manning*, utilizzata per modellare una portata uniforme costante:

$$S_f = \left(\frac{n}{1,486} \right)^2 \cdot \frac{Q \cdot |U|}{A \cdot R^{4/3}} \quad (3.26)$$

Dove n è il coefficiente di scabrezza di *Manning*, R è il raggio idraulico e U è la velocità media dell'acqua.

L'uso del segno di valore assoluto sul termine di velocità U rende S_f una quantità direzionale (poiché Q può essere positivo o negativo) e garantisce che la forza di attrito si opponga sempre al flusso.

Per una specifica geometria della sezione trasversale, l'area di flusso A è funzione della profondità dell'acqua, che a sua volta può essere ottenuta dal carico idraulico totale H . Pertanto le variabili dipendenti in queste equazioni sono la portata Q e il carico totale H , che sono funzioni dello spazio x e del tempo t . Per risolvere queste equazioni su un singolo condotto di lunghezza L , è necessario un insieme di condizioni iniziali per H e Q all'istante di tempo iniziale $t = 0$, nonché condizioni al contorno in $x = 0$ e $x = L$ per tutti i tempi t .

Combinando l'equazione (3.24) e (3.25) si ottiene una terza equazione che deve essere risolta per ogni condotto ad ogni passo di calcolo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g \cdot A \cdot S_f - 2U \cdot \frac{\partial A}{\partial t} - U^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (3.27)$$

Sebbene questa equazione possa essere utilizzata per calcolare la traiettoria temporale della portata in un condotto, è necessaria un'altra relazione per fare lo stesso per le teste. La rappresentazione nodo- collegamento di una rete di trasporto in *SWMM* (figura 49), avviene fornendo una relazione di continuità ai nodi di giunzione che collegano i condotti insieme all'interno di una rete di trasporto.

Come illustrato in figura, si presume che esista una superficie dell'acqua continua tra l'elevazione dell'acqua in un nodo e nei condotti che entrano ed escono da esso. Sono possibili due tipologie di nodi: si suppone che i nodi di giunzione non di stoccaggio siano punti con volume e superficie pari a zero, mentre i nodi di stoccaggio (come stagni e serbatoi) contengono sia volume che l'area superficiale.

Ogni assemblaggio di nodi è costituito dal nodo stesso e dalla metà della lunghezza di ogni ramo ad esso collegato. La conservazione del flusso per l'assemblaggio richiede che la variazione di volume rispetto al tempo sia uguale alla differenza tra afflusso e deflusso. In termini di equazione:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = A_s \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q \quad (3.28)$$

dove:

- V è il volume nei condotti collegati al nodo;

- A_s è la superficie nei condotti collegati al nodo;
- $\sum Q$ è il flusso netto nei condotti collegati al nodo (afflusso-deflusso).

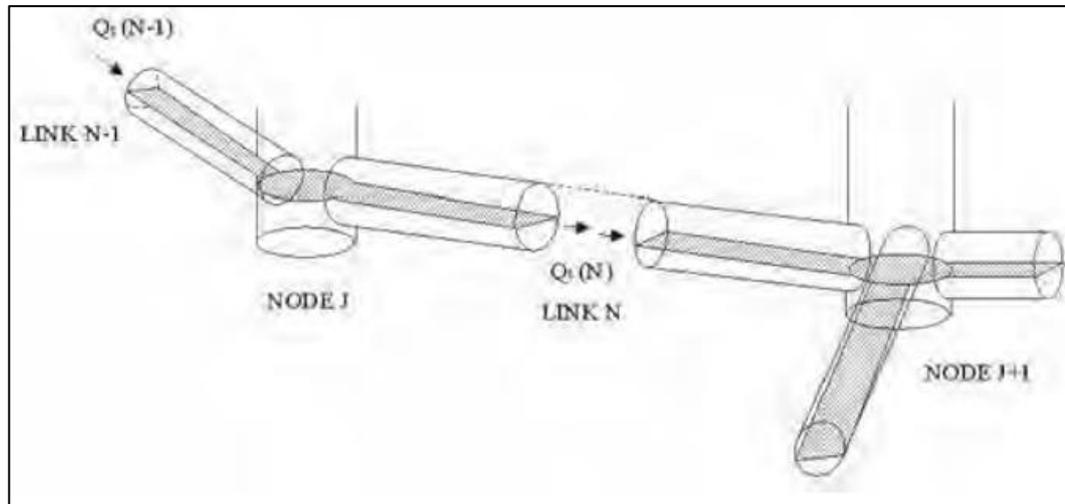


Figura 49: Rappresentazione nodo-collegamento di una rete di trasporto in SWMM (Baratti E., 2009).

Il termine $\sum Q$ include il flusso nei condotti collegati al nodo, nonché eventuali afflussi imposti dall'esterno come il deflusso in caso di pioggia o il flusso sanitario del tempo asciutto.

La superficie nei condotti collegati al nodo A_s è costituita dalla superficie di accumulo del nodo A_{SN} (se si tratta di un nodo di stoccaggio) più l'area della superficie fornita dai rami ad essa collegati, $\sum A_{SL}$, dove A_{SL} è l'area fornita da un singolo ramo di connessione. Pertanto, l'equazione di continuità del nodo può essere scritta come:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q}{A_{SN} + \sum A_{SL}} \quad (3.29)$$

La profondità del flusso all'estremità di un condotto collegato a un nodo può essere calcolata come la differenza tra il carico idraulico totale in corrispondenza del nodo e l'elevazione inversa del condotto. Le aree della superficie del nodo e del collegamento vengono calcolate come funzioni delle rispettive profondità di flusso.

Le equazioni (3.27) e (3.29) forniscono un insieme accoppiato di equazioni alle derivate parziali che risolvono la portata Q nei condotti e il carico idraulico totale H in corrispondenza dei nodi della rete di trasporto. Poiché non possono essere risolti analiticamente, è necessario utilizzare una procedura di soluzione numerica.

4 CAPITOLO IV

Nella fase preliminare dello studio condotto è stato constatato che vi sono punti del sistema fognario per i quali non sono ben chiari sia la topografia della rete stessa, sia la geometria di alcuni snodi idraulici. Inoltre, è stato possibile riscontrare che la cartografia esistente presenta alcune difficoltà di lettura, in particolar modo in presenza dei punti in cui due o più collettori convergono, senza particolari indicazioni sulle direzioni principali in cui viene convogliata l'acqua.

L'individuazione delle aree drenate dai collettori è stata possibile grazie allo svolgimento di quattro sopralluoghi, i quali svolti con gli addetti della *SMAT*, e in cui è stato rilevato come l'area drenata dallo scarico del Canale dei Molassi, lungo la Dora Riparia, sia particolarmente ampia. Ancora, è stato possibile verificare che parte dell'area drenata dal collettore di via Borgo Dora (alla sezione di chiusura prossima a Ponte Mosca) sia condivisa con il collettore di via San Pietro in Vincoli.

Constatate con precisione le aree drenate, le caratteristiche dei collettori e tutte le informazioni necessarie a rappresentare quanto più fedelmente possibile il comportamento idraulico della rete fognaria, si è passati alla realizzazione del modello idraulico con l'ausilio del software *SWMM*, utile a valutare la risposta per diversi eventi di pioggia. Naturalmente, per realizzare una simulazione realistica, è indispensabile ottenere un modello che provveda a fornire dei risultati quanto più vicini agli eventi naturali osservati. Tale operazione è comunemente definita *calibrazione* o *taratura* del modello.

Dunque, una volta rappresentato lo schema della rete di drenaggio nel programma di calcolo, devono essere immessi dei valori a una serie di coefficienti e parametri che schematizzano la realtà. La procedura deve anticipare ogni applicazione pratica, consentendo di determinare quei valori dei parametri che permettono di massimizzare la credibilità della simulazione realizzata dal modello.

Andare a definire correttamente i valori di tutti i parametri che influiscono sull'insieme del modulo idrologico e idraulico, rappresenta una delle fasi più

importati nella simulazione di una rete idraulica, poiché la simulazione eseguita deve mostrare dei risultati credibili che siano utili alla progettazione di opere e interventi. Difatti, a diversi valori dei coefficienti e dei parametri corrispondono differenti risposte da parte del modello. Alcuni parametri sono determinabili a priori, senza adottare l'apposita procedura di calibrazione.

I risultati delle simulazioni sono stati valutati attraverso l'utilizzo del modello *Dynamic Wave*, il quale ha permesso di effettuare uno studio della propagazione dell'onda dinamica integrando le equazioni monodimensionali di *De Saint Venant*. Tale metodo di analisi è il più raffinato di cui dispone il programma, ragion per cui fornisce i risultati teoricamente più accurati.

Nel caso specifico i termini inerziali delle equazioni sono stati trascurati, mentre nelle analisi non sono state considerate le perdite di carico localizzate (curve a gomito nei collettori); tuttavia tali perdite sono state compensate dall'utilizzo di appropriati valori dei coefficienti di scabrezza di *Gauckler-Strickler*.

Con la simulazione del modello sono stati ottenuti risultati sufficientemente sensati, poiché le aree del modello, che risultano essere allagate per un determinato evento, coincidono con quelle della realtà. In seguito a questo lavoro, la *SMAT* ha installato all'interno della rete di drenaggio un misuratore, così da poter essere in grado di registrare i valori del livello dell'acqua in continuità, ovvero con dati ad intervallo di 5 minuti gli uni dagli altri.

Dai valori del livello dell'acqua attraverso la nota relazione di *Manning* (3.3) ci si è ricondotti ai valori di portata. Lo strumento installato dalla società metropolitana delle acque di Torino, è ubicato in corrispondenza del collettore di via Borgo Dora, all'altezza del "Giardino Cardinale Michele Pellegrino", al fine di poter misurare una serie di eventi di piena.

Lo scopo del presente lavoro di tesi è stato, quindi, cercare di validare il modello idraulico già realizzato. Ossia, valutare se il modello esistente, grazie ai dati di portata misurati dallo strumento, potesse continuare a fornire dei risultati attendibili che si attestino vicino alla realtà fisica.

4.1 Eventi registrati

Per realizzare l'operazione di calibrazione del modello della rete di scolo delle acque in *SWMM* sono stati dapprima reperiti, dall'azienda *SMAT*, i dati di portata Q (l/s) e di livello h (m) registrati dal misuratore. I dati dello strumento a disposizione partono dalle ore 8:05 del 1 gennaio 2019. Pertanto, nello studio condotto sono stati presi in considerazione soltanto i dati per cui si è effettivamente verificata un aumento/diminuzione ragionevole e combinata dei livelli e delle portate.

Oltre ai dati rilevati dalla società *SMAT* sono stati recuperati, dagli annali della banca dati meteorologica dell'*ARPA Piemonte* (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale), i valori della precipitazione oraria registrati dalla stazione termoisolo-pluvioanemometrica con radiometro posizionata in via della Consolata al civico 10 nella città di Torino.

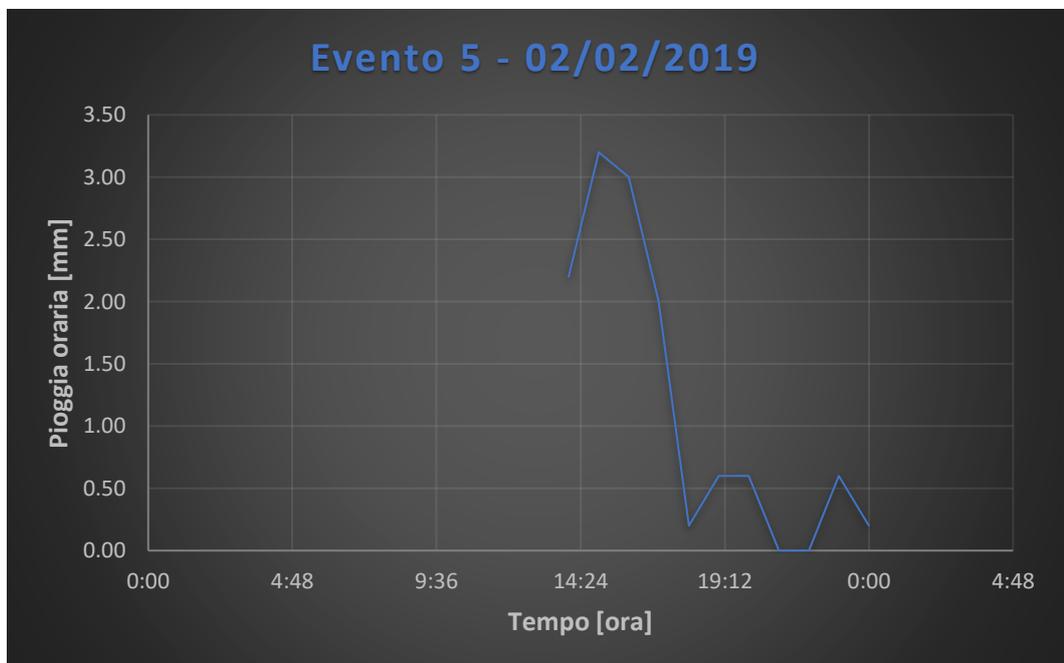
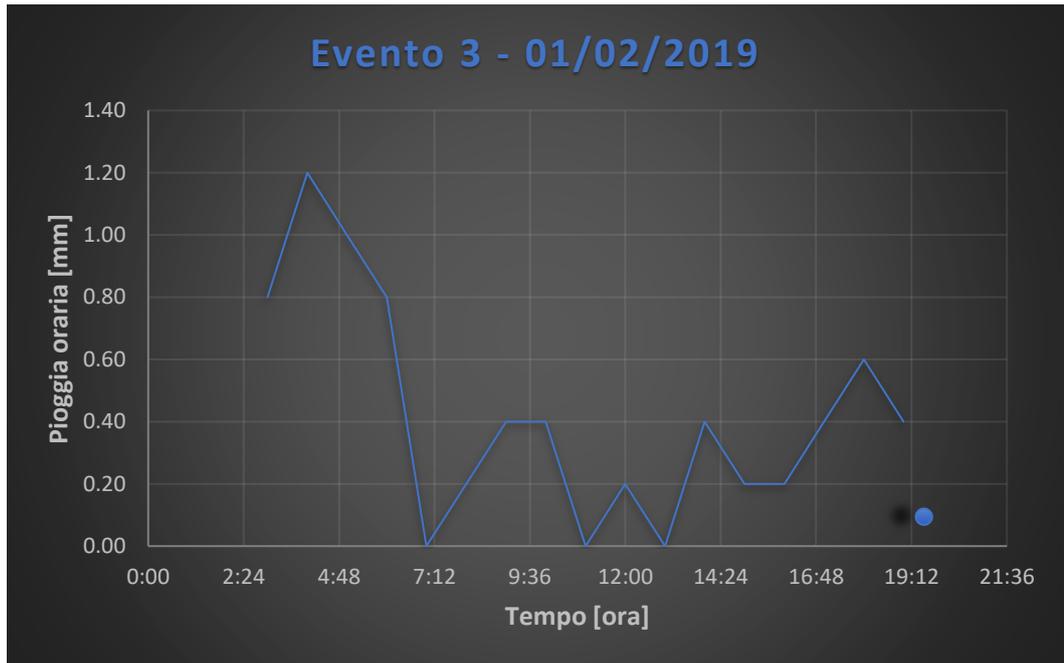
Con riferimento ai dati di portata e livello forniti dalla *SMAT*, si è notato che in alcune situazioni il misuratore installato nella rete ha registrato dei valori esageratamente elevati, oppure, in altre circostanze ha individuato dei valori non nulli, nonostante nei periodi antecedenti a quelle date non si fosse verificato alcun evento di pioggia.

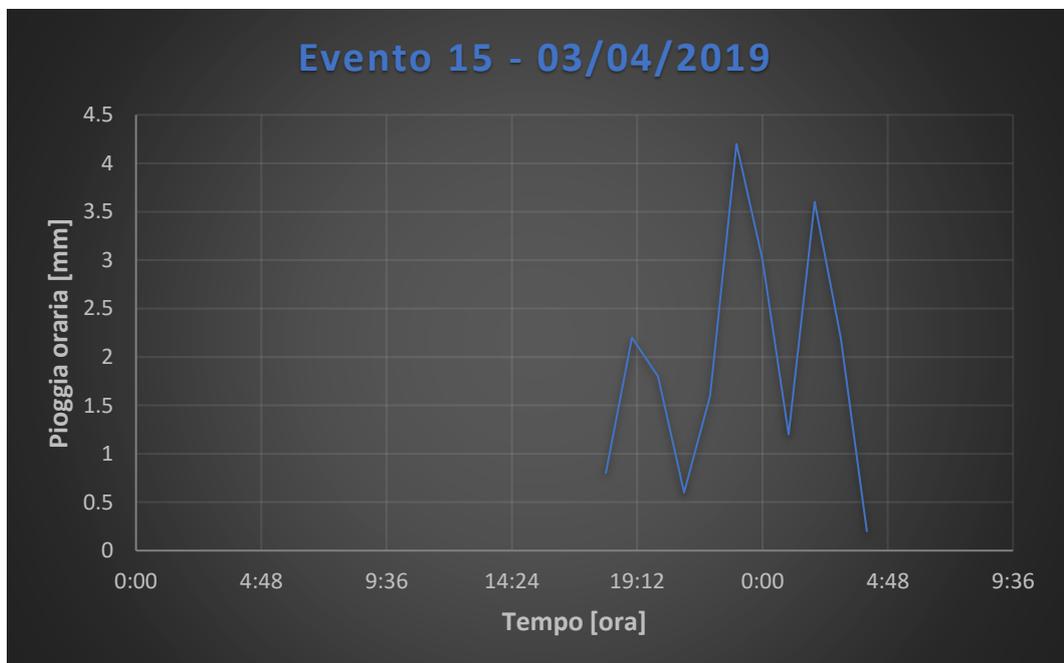
In tali situazioni è stato deciso di trascurare questi dati dall'analisi essendo poco realistici, considerando che potessero essere piuttosto dovuti a dei malfunzionamenti della strumentazione adottata.

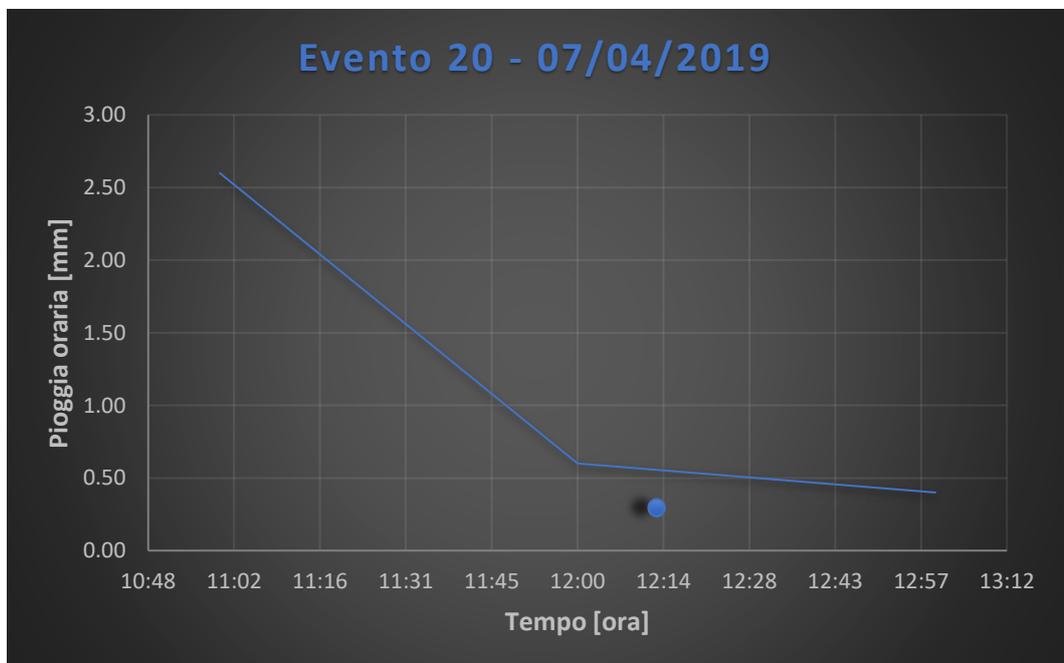
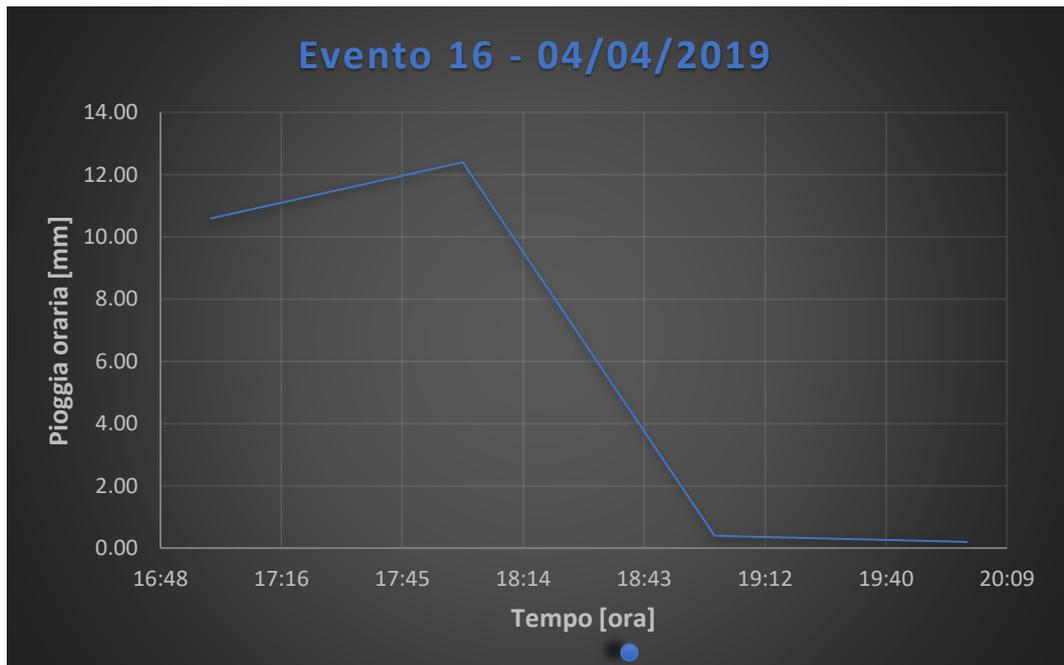


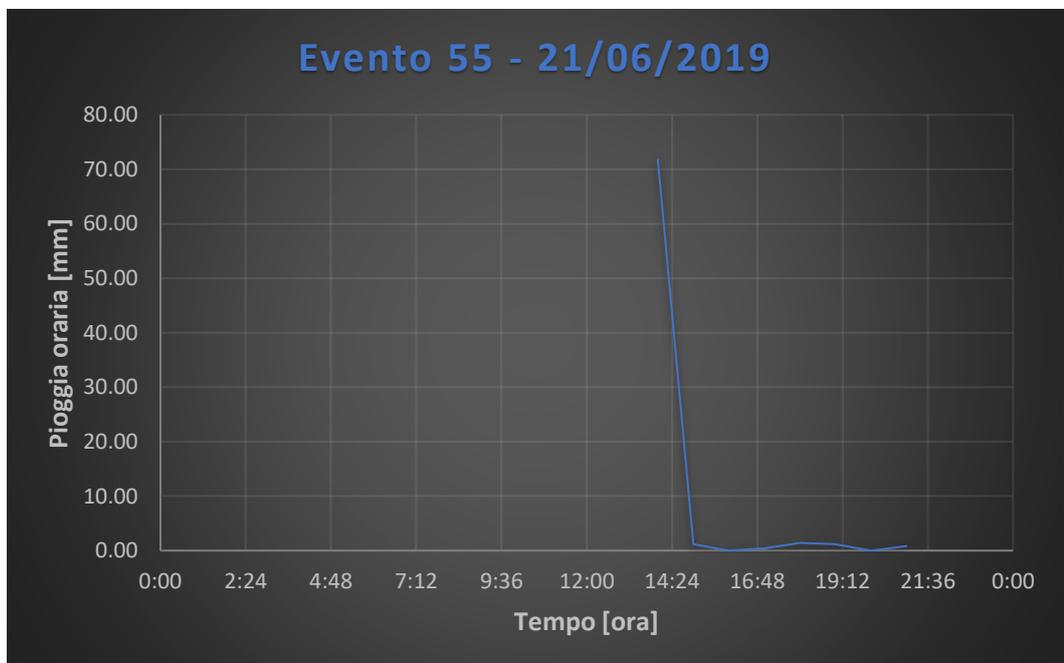
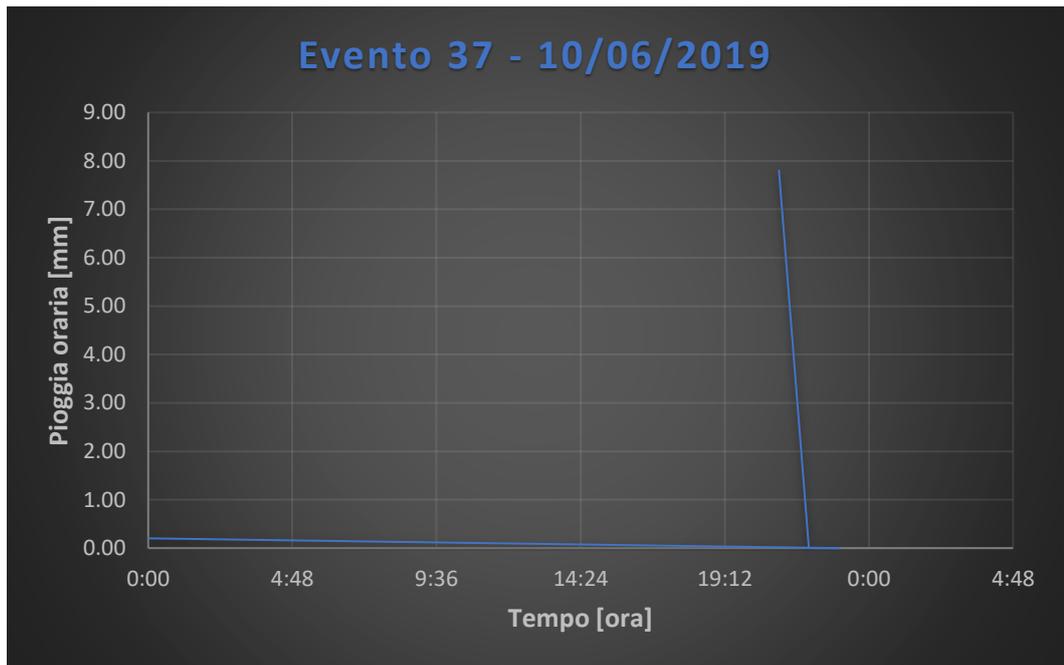
Figura 50: Stazione meteorologica in via della Consolata 10 nella città di Torino (ARPA Piemonte, 2020).

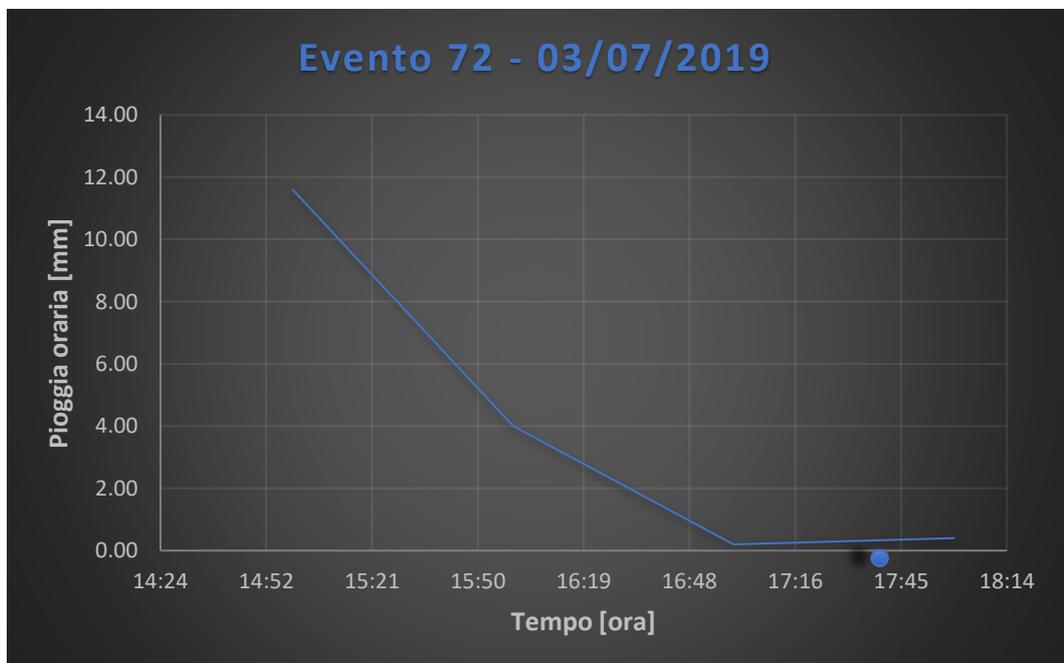
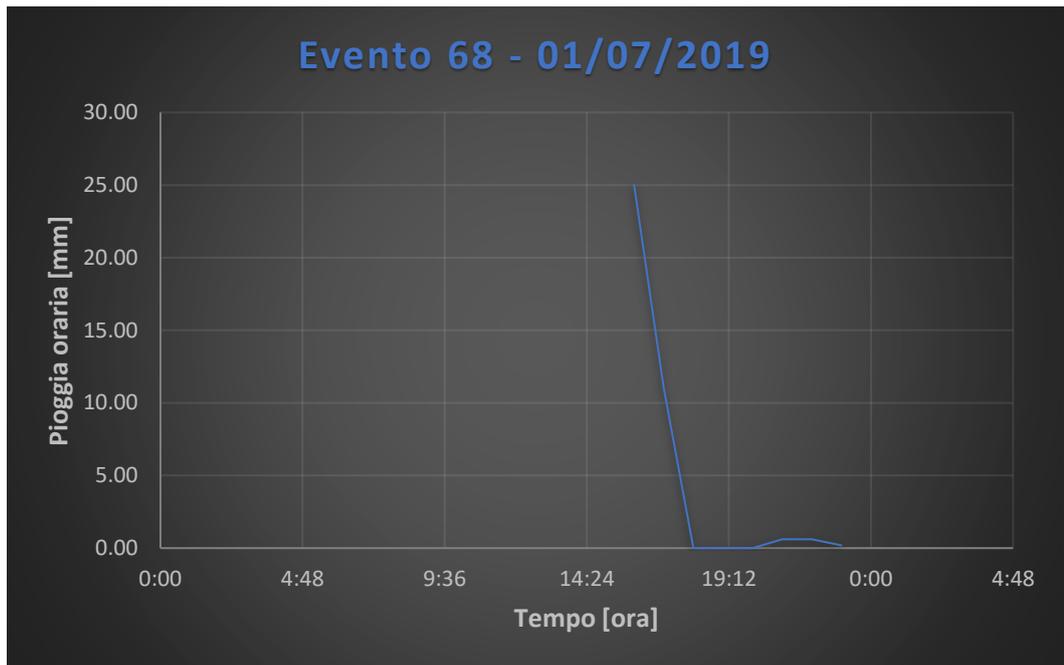
Analizzando i dati di portata e quelli di livello osservati dallo strumento, e i valori di precipitazione registrati dalla stazione meteorologica, si è stabilito l'inizio e la fine di ogni evento di pioggia e, dunque, la durata dell'evento. In virtù dell'analisi svolta sono stati presi in considerazione gli eventi di precipitazione: 3, 5, 11, 15, 16, 20, 37, 55, 68, 72, 110 e 135. Gli eventi pluviometrici sopra menzionati sono stati riportati nei grafici a seguire:











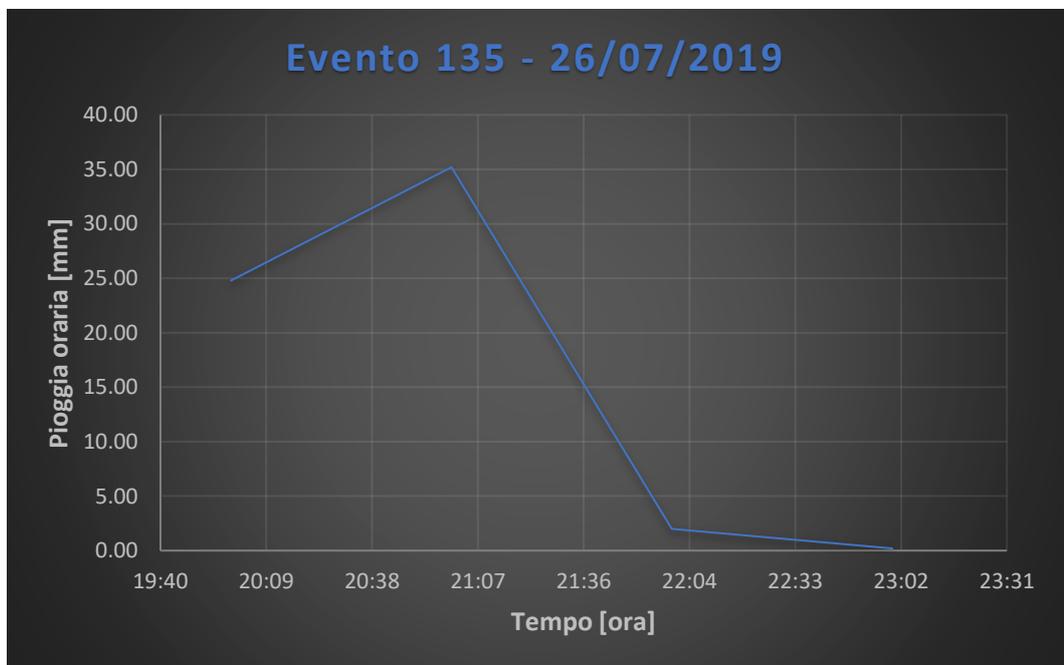
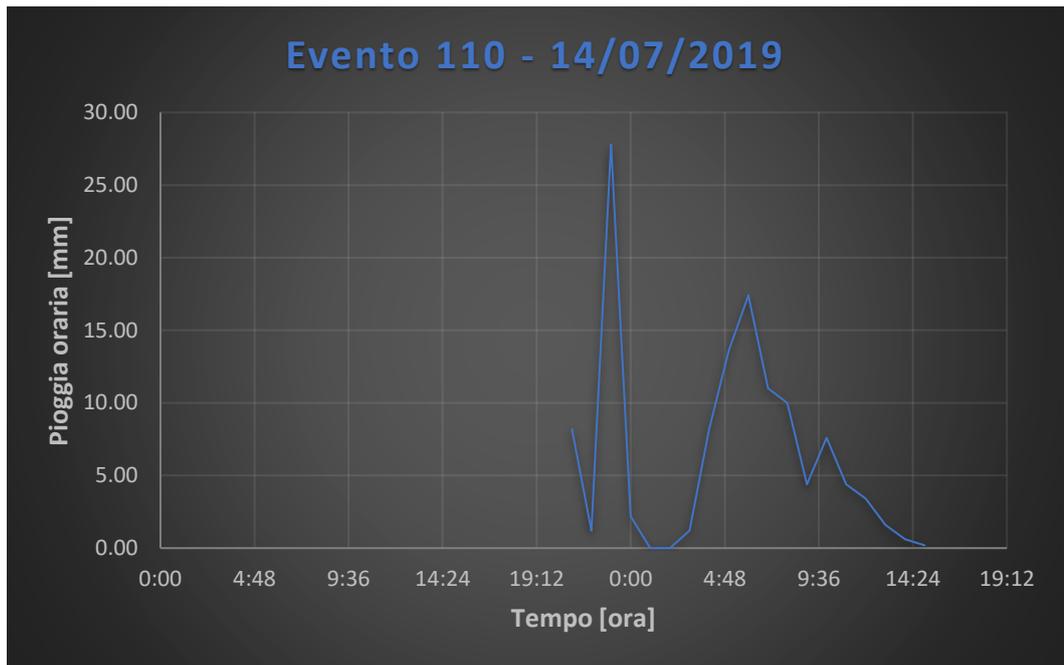


Figura 51: Eventi di precipitazione analizzati (elaborazione propria).

4.2 Calibrazione e validazione del modello

I modelli numerici di tipo idrologico-idraulico, come tutti quelli di simulazione, sono caratterizzati da numerosi parametri i cui valori, definiti dall'utente, influenzano i risultati della simulazione.

Come sottolineato in precedenza, si chiama calibrazione o taratura del modello quel processo che permette di stimare e di attribuire a ciascun parametro un determinato valore. Il fine è di ottimizzare i risultati ottenuti dal modello minimizzando lo scarto fra i valori simulati e quelli misurati.

Accade spesso che la risposta del bacino non sia di tipo lineare, per cui i valori dei parametri possono essere diversi da evento a evento. Inoltre, i parametri dei modelli non sempre riescono a rappresentare la realtà fisica a essa associata poiché, spesso, si attribuisce agli stessi parametri l'intera incertezza della modellizzazione adottata sia di carattere idrologico e sia idraulico. In tali circostanze, l'utente non è più in grado di distinguere in maniera evidente il significato dei parametri e, quindi, il valore più realistico e attendibile da attribuire agli stessi. In tal senso, si rischia di svolgere simulazioni poco corrette e pervenire a risultati per niente affidabili.

Alle volte, i valori più idonei da assegnare ai parametri del modello si possono determinare attraverso indagini in sito o mediante la consultazione di tabelle presenti in letteratura tecnico-scientifica; invece, in molte altre occasioni capita che tali parametri rappresentano caratteristiche utopiche del bacino e, pertanto, devono essere valutati tramite un processo iterativo, ovvero cambiando a ogni step il valore dei parametri fino a raggiungere la risposta richiesta.

Al fine di verificare l'effettivo grado di affidabilità dei risultati ottenuti mediante l'operazione di calibrazione, risulta necessario effettuare il procedimento di verifica o validazione.

Bisogna, però, fare attenzione a non confondere l'operazione di calibrazione con quella di validazione. Si tratta di due fasi distinte che possono essere anche

realizzate con le medesime modalità. Difatti, con il processo di calibrazione si ricercano i valori dei parametri che assicurano una buona corrispondenza tra i livelli, oppure le portate simulate dal modello e quelle registrate dal misuratore, con riferimento a un preciso evento di precipitazione.

Con la validazione del modello, l'obiettivo è di valutare l'affidabilità dello stesso con i medesimi valori dei parametri determinati nella fase di calibrazione, ma con un campione di eventi differente da quello adoperato in fase di calibrazione. Così da verificare se il modello creato risulti essere idoneo a rappresentare il reale funzionamento del sistema di drenaggio.

Dunque, lo scopo della validazione di un modello numerico di simulazione è individuare le possibili divergenze nella stima dei valori attribuiti ai parametri durante la fase di calibrazione, in quanto accade spesso che il modello si comporti adeguatamente nell'operazione di calibrazione, ma non in quella di validazione. In caso contrario sarà, allora, necessario rivedere il processo di calibrazione determinando le possibili cause che hanno pregiudicato il risultato finale.

4.3 La calibrazione in *SWMM*

4.3.1 Dati di Calibrazione

Il programma di modellazione idraulica *SWMM*, come descritto in precedenza, può comparare i risultati di una simulazione con i dati da campo misurati. Prima che il software possa utilizzare tali dati di calibrazione è, però, necessario immetterli all'interno di un file di testo formattato in un determinato modo e registrarli con il progetto.

4.3.2 File di calibrazione

I file di calibrazione contengono le misure di un singolo parametro in una o più posizioni, le quali si possono confrontare con i valori simulati nei grafici delle

serie storiche. È possibile utilizzare file separati per ciascuno dei seguenti parametri:

- Deflusso del sottobacino;
- Rimozione degli inquinanti dal sottobacino;
- Deflusso delle acque sotterranee;
- Elevazione delle acque sotterranee;
- Profondità del manto nevoso;
- Profondità dell'acqua nel nodo;
- Afflusso laterale del nodo;
- Allagamento del nodo;
- Qualità dell'acqua del nodo;
- Deflusso nel ramo;
- Profondità del deflusso nel ramo;
- Velocità del deflusso nel ramo.

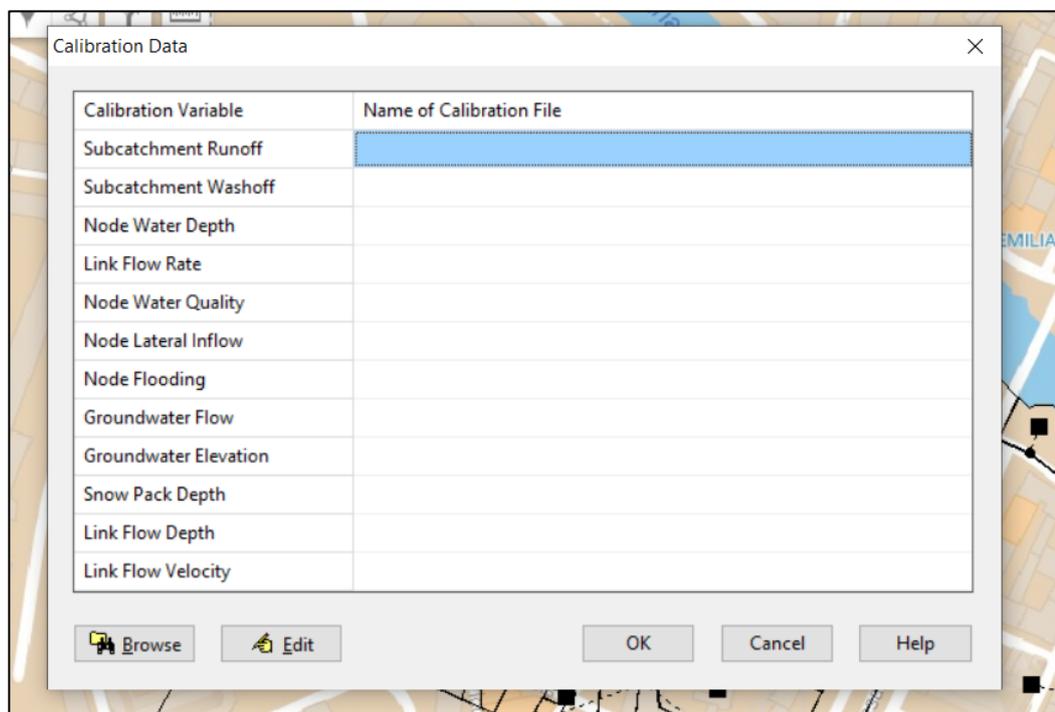


Figura 52: Calibration Data nel programma SWMM (elaborazione propria).

4.3.3 Visualizzazione di tutti i dati del progetto

Un elenco di tutti i dati del progetto – ad eccezione delle coordinate della mappa – può essere visualizzato in una finestra non modificabile formattata per l'input al motore di calcolo di *SWMM* (figura 53). Ciò può essere utile per verificare la coerenza dei dati e per assicurarsi che non manchino componenti chiave. Il formato dei dati in questo elenco è lo stesso utilizzato quando il file viene salvato su disco.

Data Category	Name	Rain Gage	Outlet	Area	%Imperv	Width	%Slope	CurbLen	SnowPack
[TITLE]	;Area compresa fra Corso Valdocco, Via Cottolengo,								
[OPTIONS]	;Via Goffredo Mameli, Corso Regina, Via della Consolata								
[EVAPORATION]	;e Via del Carmine								
[RAINGAGES]	;pendenza 1.85 da cartografia								
[SUBCATCHMENTS]	;pendenza 2.31 da sensitività								
[SUBAREAS]	;Area Piccola								
[INFILTRATION]	;A = 6.21								
[JUNCTIONS]	;Width = 123.46								
[OUTFALLS]	;Slope = 0.9								
[CONDUITS]	;Area Grande								
[XSECTIONS]	;A = 20.6598								
[CURVES]	;Width = 195.79								
[TIMESERIES]	A1	EventoIntensitàOrdinaria N41		5.0598	95	123.46	0.9	0	
[REPORT]	A3	EventoIntensitàOrdinaria N1		0.08609	95	31.89	0.86	0	
	A4	EventoIntensitàOrdinaria N2		0.06787	95	31.81	0.75	0	
	A5	EventoIntensitàOrdinaria N4		0.1007	95	32.84	0.61	0	
	A6	EventoIntensitàOrdinaria N5		0.06684	95	31.83	0.58	0	
	;Area drenata tra Porta Palazzo e								
	;Via Borgo Dora								

Figura 53: Project Data nel programma SWMM (elaborazione propria).

4.4 Le fasi della calibrazione

La calibrazione di un modello è composta da più fasi. La prima fase è la scelta dei parametri, dipendente dalla composizione del modello utilizzato e da considerazioni legate alla possibilità di ridurre il numero dei parametri da aggiustare, tralasciando quelli per cui il modello è poco sensibile.

Lo studio di sensibilità consiste nel verificare l'incidenza che la variazione di ciascun parametro avrà sul risultato finale. Tale analisi è utilissima, soprattutto, nelle situazioni in cui non si dispone di casi di studio sperimentali di confronto e si

vuole permettere l'utilizzo del modello a casi differenti da quelli per i quali esso è stato calibrato.

La seconda fase consiste nello scegliere un criterio di valutazione che sia in grado di prevedere un determinato risultato (criterio euristico) che dovrà poi essere convalidato; cioè definendo una specifica funzione obiettivo. Infatti, per il procedimento euristico si definisce un metodo di approccio alla soluzione dei problemi che non segue un chiaro percorso, bensì che si affida all'intuito dell'utente e allo stato temporaneo delle circostanze, al fine di generare nuova conoscenza riguardo: le portate al colmo registrate e simulate, i volumi dell'evento di piena, i tempi di occorrenza della portata al colmo, ecc. Delle valutazioni più oggettive, invece, è possibile ottenerle realizzando statistiche dei rapporti fra volumi, livelli dell'acqua o portate simulate e i correlati valori osservati.

Naturalmente, saranno presi in considerazione solo quei parametri che avranno fornito valori dei rapporti prossimi all'unità. In maniera ancora più oggettiva, la calibrazione dei parametri si effettua servendosi del calcolo basato sulle funzioni obiettivo (*objective functions*) che rappresentano uno strumento a cui si ricorre quando l'informazione empirica disponibile è attendibile e numericamente cospicua. Qualora si adottasse il metodo della funzione obiettivo, la calibrazione richiede una fase aggiuntiva che consiste nella scelta del metodo di ottimizzazione e, eventualmente, del criterio di convergenza.

Nel momento in cui il modello è calibrato, si possono usare le stesse funzioni di ottimizzazione per il processo di validazione. In questa fase le funzioni vengono definite funzioni d'errore (*error functions*). Il livello di attendibilità che si vuole conseguire si può fissare assumendo un determinato errore soglia che sia pari a zero o a un valore prossimo a zero. Quanto più la funzione d'errore è prossima all'errore soglia, tanto più la verifica mostra dei risultati accettabili.

Nel presente lavoro di tesi, per poter quantificare l'efficienza della simulazione, si è scelto di definire una funzione obiettivo che consente di valutare con la massima precisione lo scarto fra i valori osservati e fra quelli simulati di un

modello. Tale funzione obiettivo è detta *Efficienza di Nash & Sutcliffe* ed è così definita:

$$E(\theta) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [x(i) - \hat{x}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}(i)]^2} \quad (4.1)$$

dove E rappresenta la funzione obiettivo, θ è il vettore dei parametri del modello, N è il numero di dati simulati, $x(i)$ è la variabile osservata, $\hat{x}(i)$ è la variabile simulata e $\bar{x}(i)$ è la media dei dati osservati.

In seguito a diversi tentativi, in cui sono stati modificati manualmente i parametri da calibrare, si è potuto caratterizzare la scabrezza dei collettori e il volume specifico di immagazzinamento (o depression storage).

Per quanto riguarda la scabrezza dei collettori, essa è stata considerata facendo variare il coefficiente di *Manning*, in particolare:

- per i collettori in PVC presenti in via Andreis interno 18 è stato assunto pari a $0,01 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$;
- per i collettori in c.a. presenti in via Andreis, via Borgo Dora e nel Canale delle Sabbionere è stato assunto pari a $0,023 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$.

Per quanto riguarda il depression storage, si è fatta distinzione tra le aree impermeabili del sottobacino e quelle permeabili, in particolare:

- per le aree impermeabili è stato considerato un valore pari a 2,8 mm;
- per le aree permeabili è stato considerato un valore pari a 5,6 mm;

Con le modifiche adottate si è riscontrato che i dati simulati si discostano di poco dai dati osservati, con degli errori soglia prossimi allo zero.

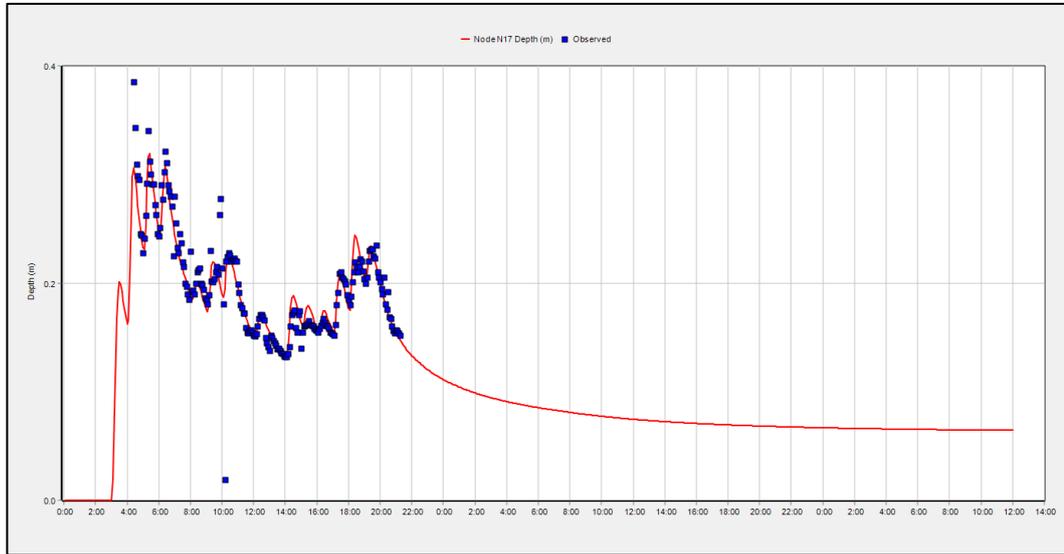
4.5 I risultati della simulazione

Una volta completata l'operazione di calibrazione del modello, è stata realizzata la sua procedura di validazione, eseguita sulla base di più eventi di precipitazione aventi intensità e durate differenti da quello considerato durante la fase di calibrazione – come visto nella figura 51. Sono stati, così, verificati i valori dei parametri determinati in fase di calibrazione per il modello della rete di drenaggio di Torino nel rione Borgo Dora.

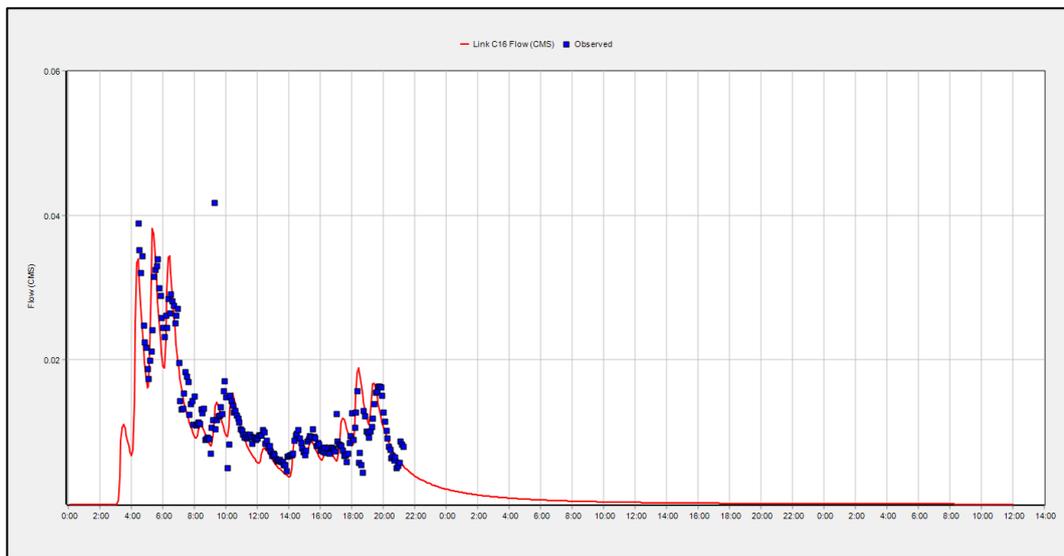
Si riportano, dunque, come risultato della simulazione del modello e per ogni evento meteorico analizzato, i grafici relativi ai valori di portata Q e di livello dell'acqua h nei collettori in corrispondenza della posizione del misuratore, quest'ultimo installato dalla *SMAT*. Nei grafici la linea rossa corrisponde alla risposta del modello in *SWMM*, mentre i quadratini blu rappresentano i valori da campo che lo strumento ha realmente misurato.

Il misuratore installato dalla *SMAT* si trova in prossimità del collettore C16 e del nodo N17, quest'ultimi all'interno del software *SWMM*.

Evento 3:



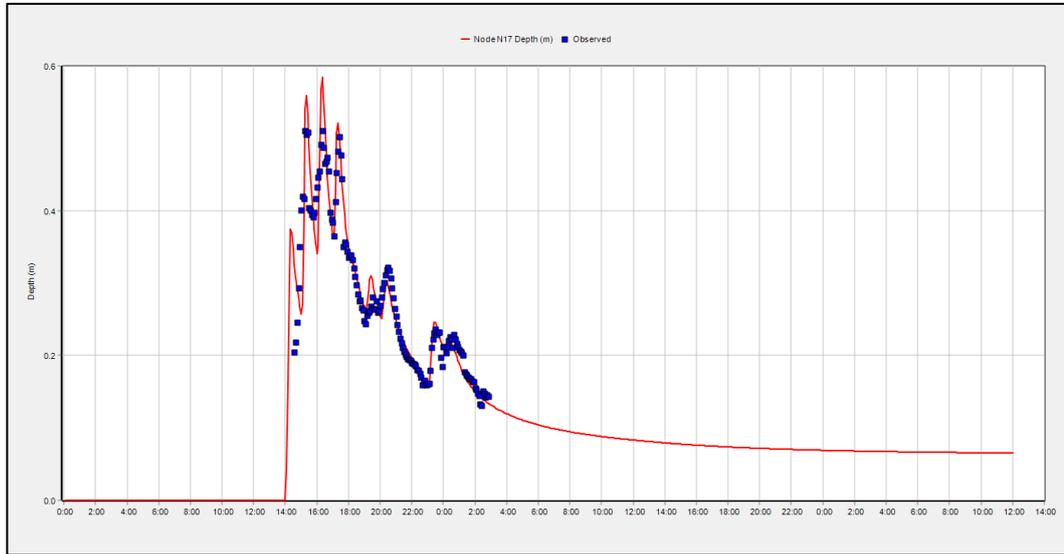
(a) .



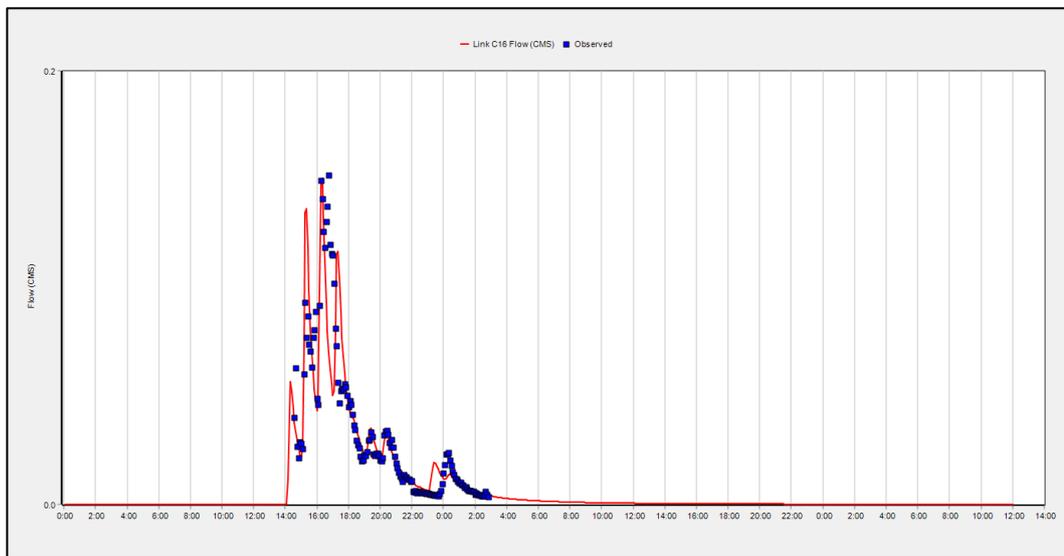
(b) .

Figura 54: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 3 (elaborazione propria).

Evento 5:



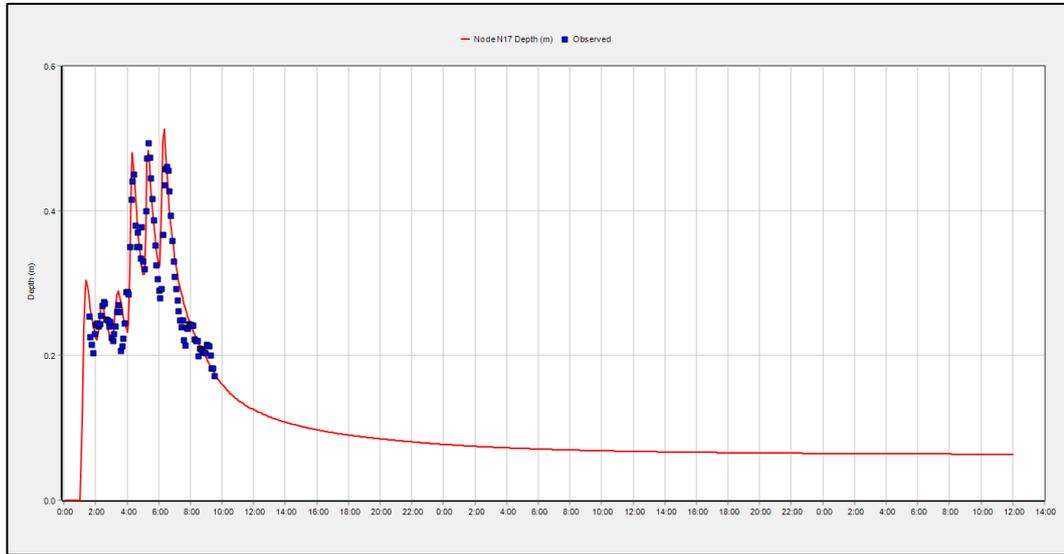
(a) .



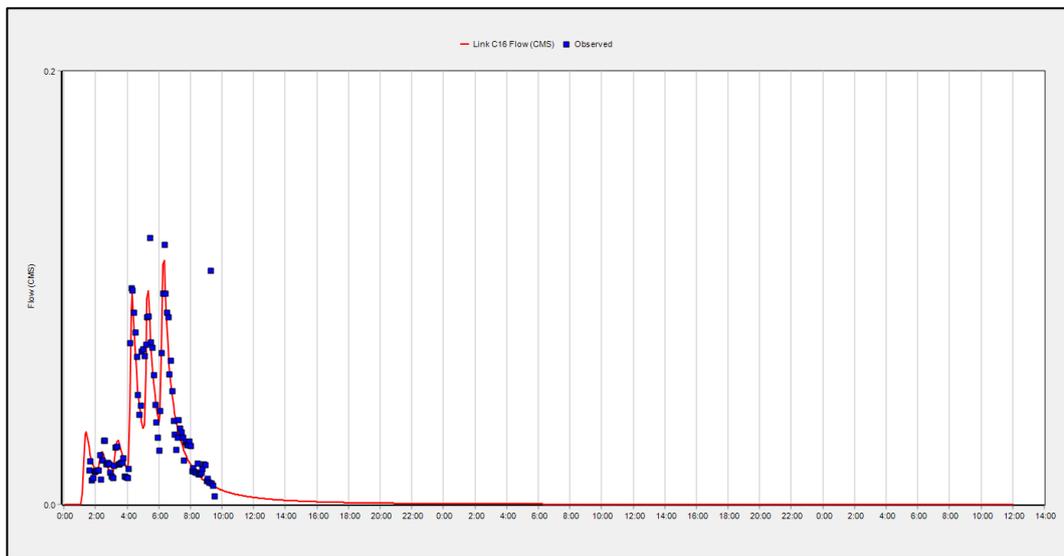
(b) .

Figura 55: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 5 (elaborazione propria).

Evento 11:



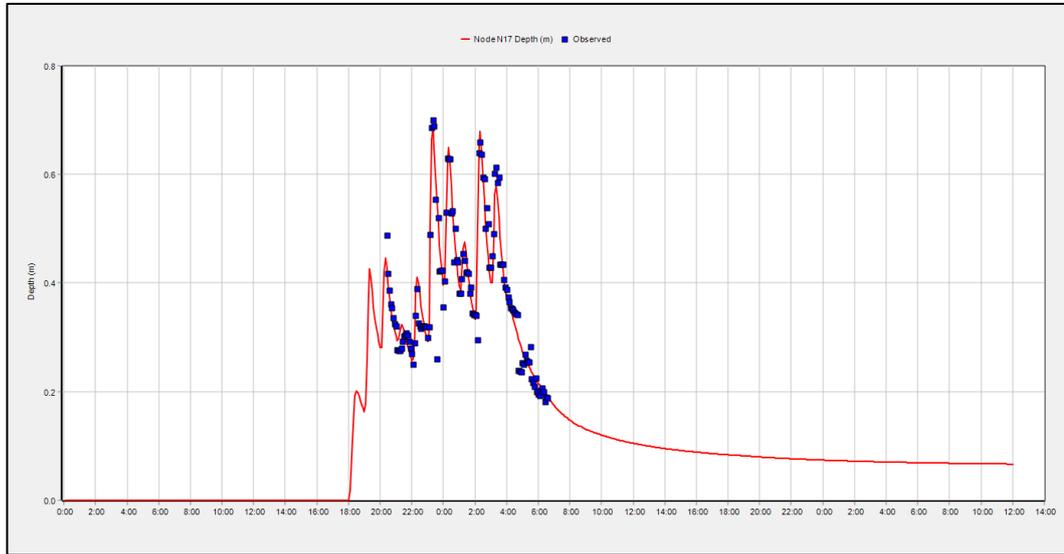
(a) .



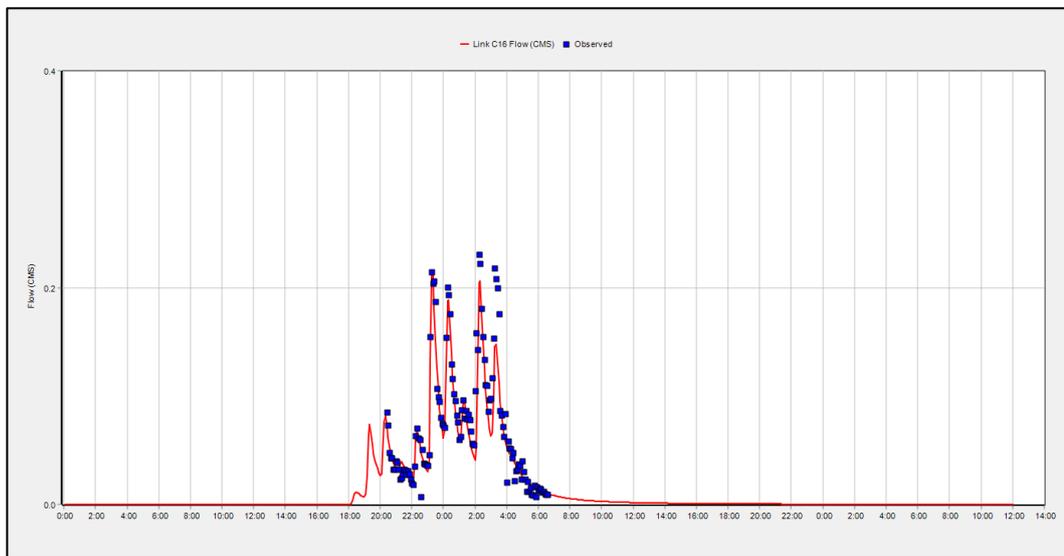
(b) .

Figura 56: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 11 (elaborazione propria).

Evento 15:



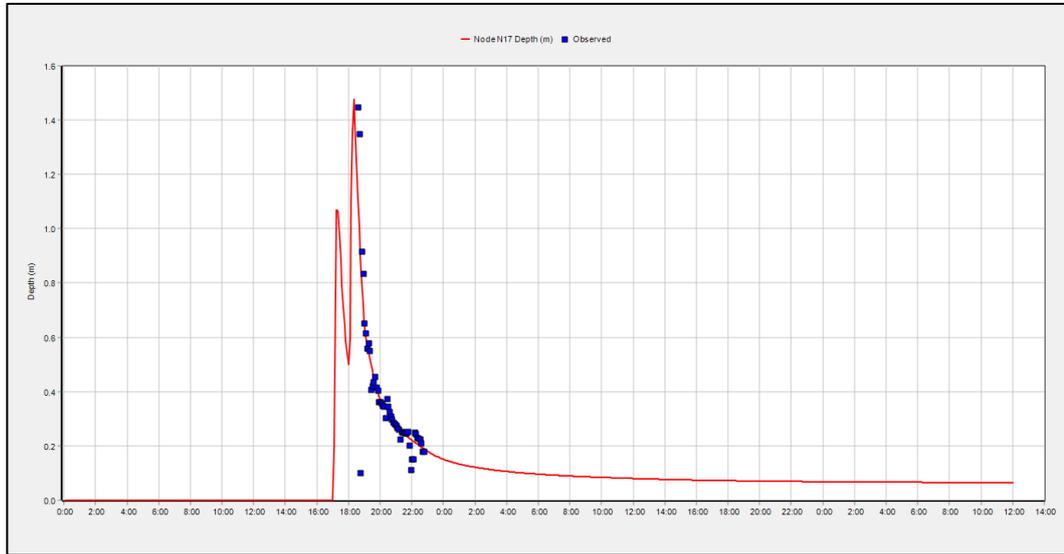
(a) .



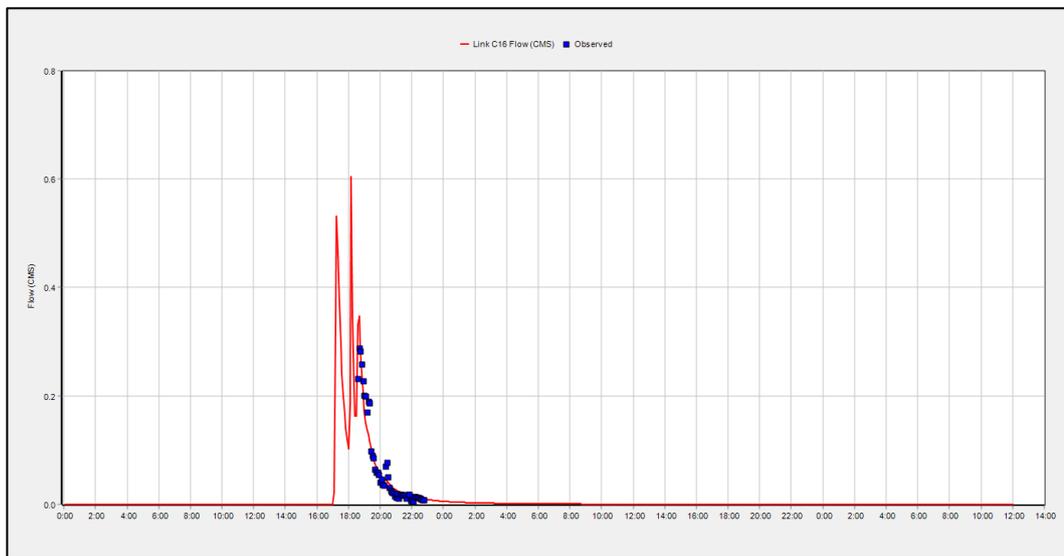
(b) .

Figura 57: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 15 (elaborazione propria).

Evento 16:



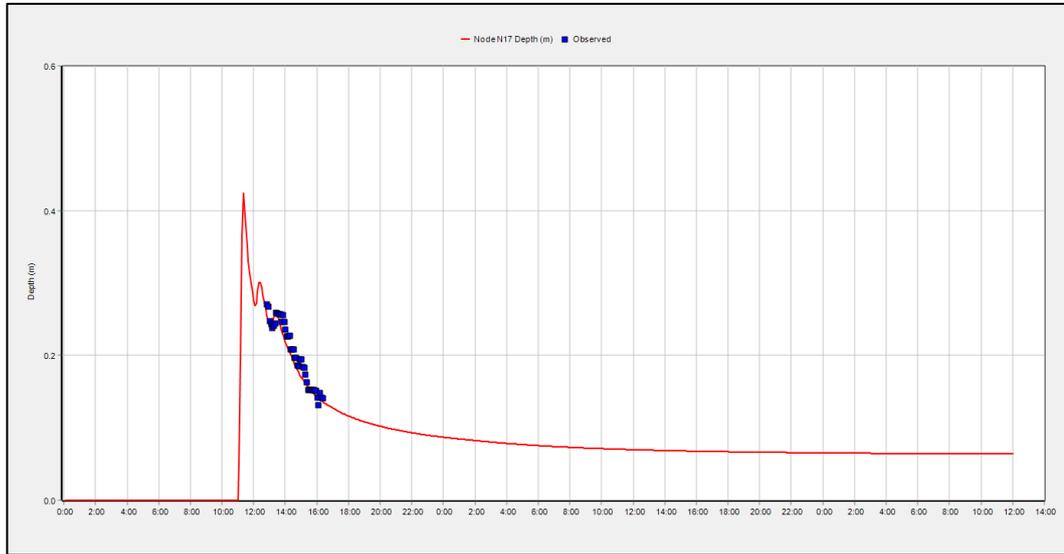
(a) .



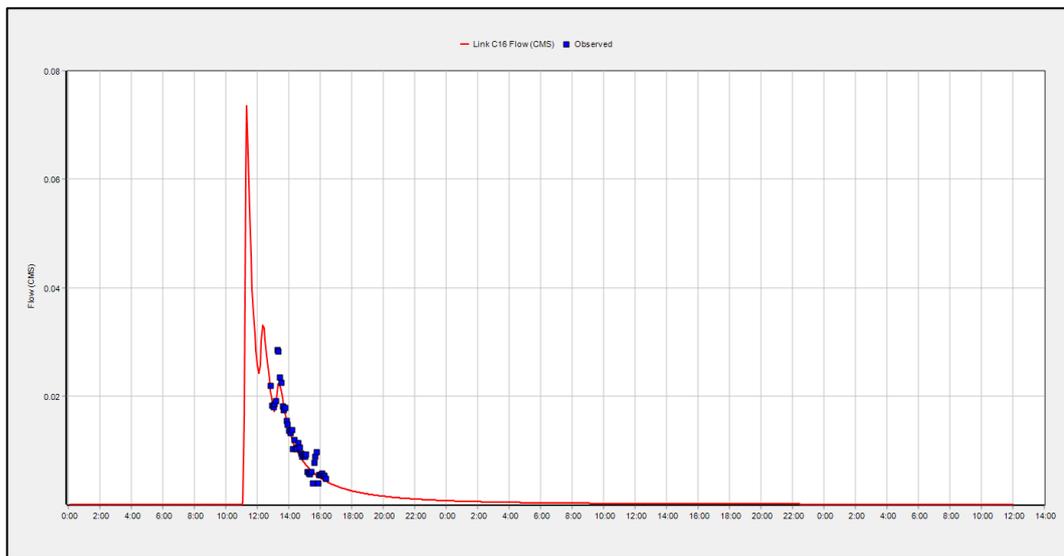
(b) .

Figura 58: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 16 (elaborazione propria).

Evento 20:



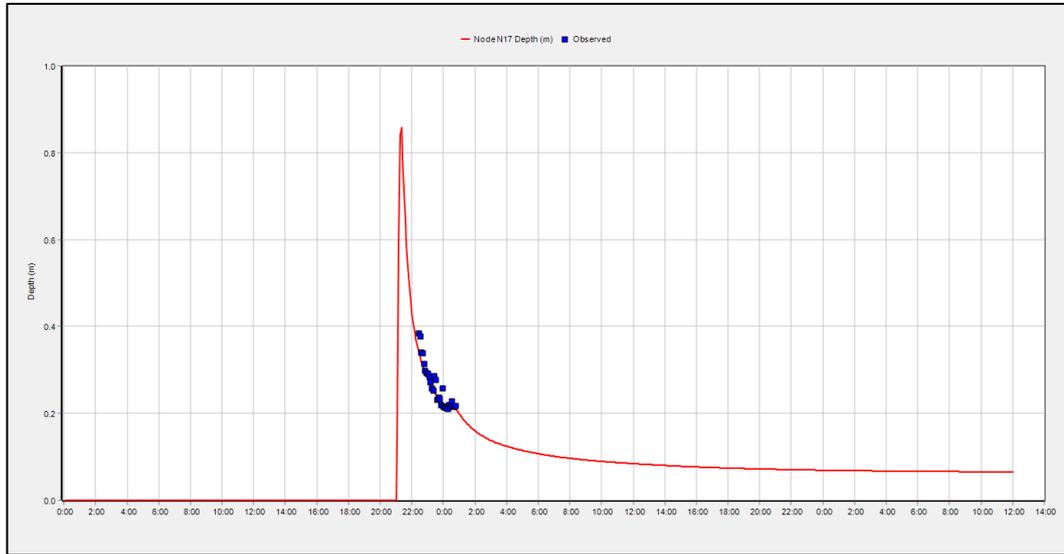
(a) .



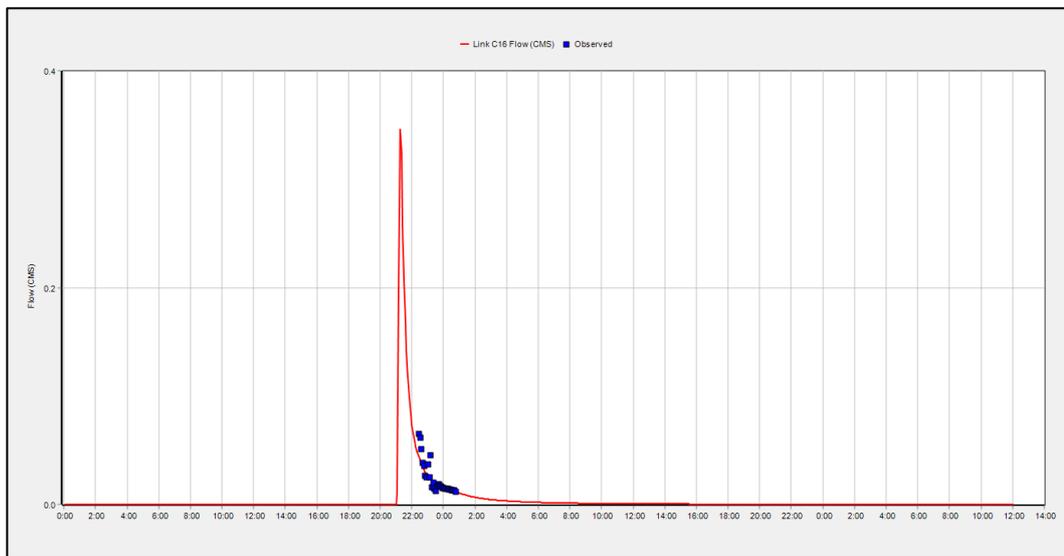
(b) .

Figura 59: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 20 (elaborazione propria).

Evento 37:



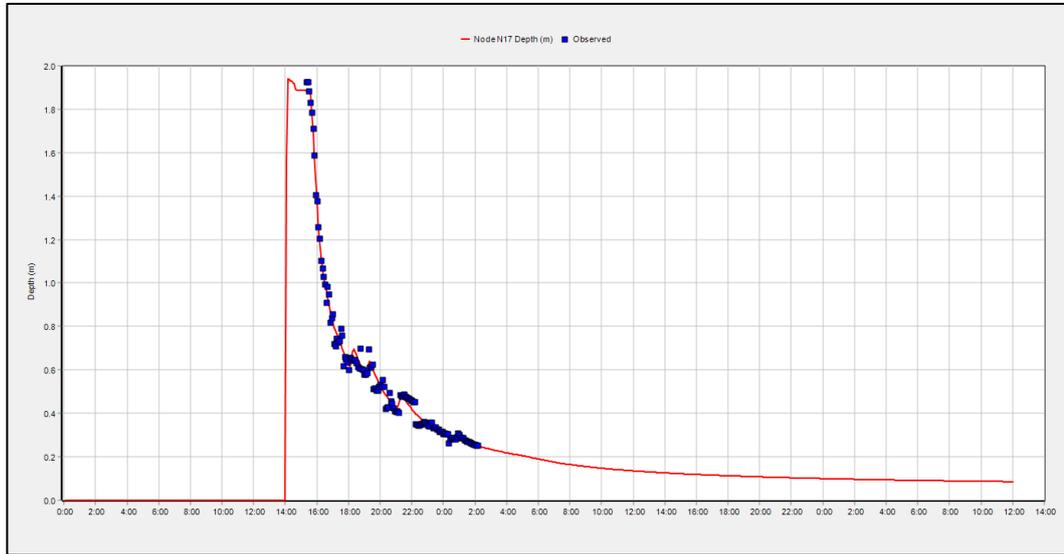
(a) .



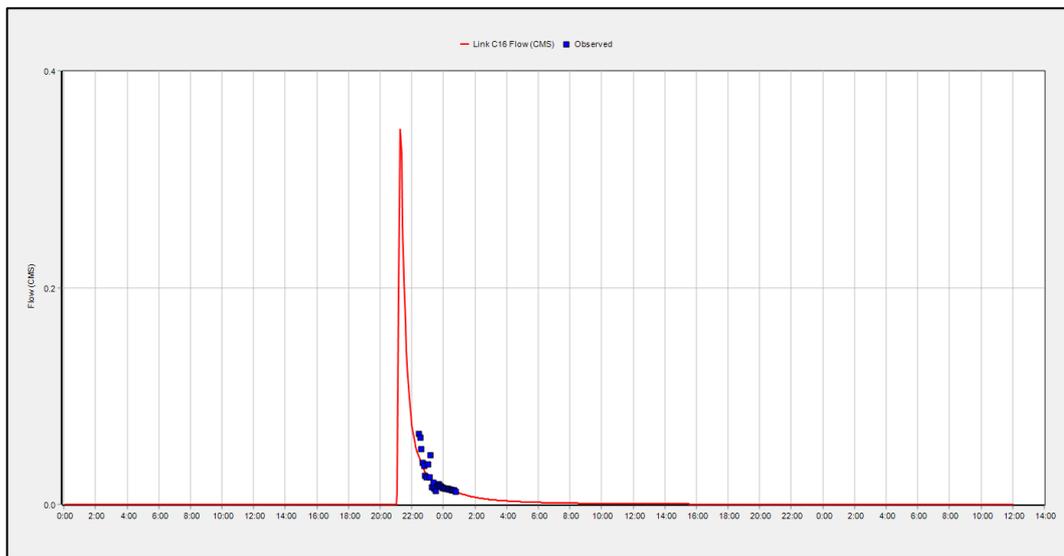
(b) .

Figura 60: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 37 (elaborazione propria).

Evento 55:



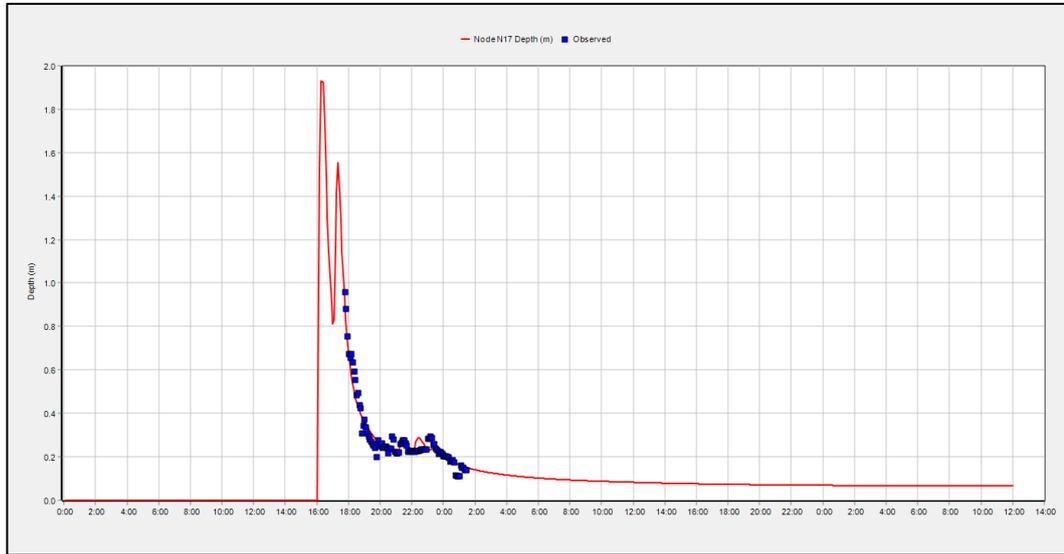
(a) .



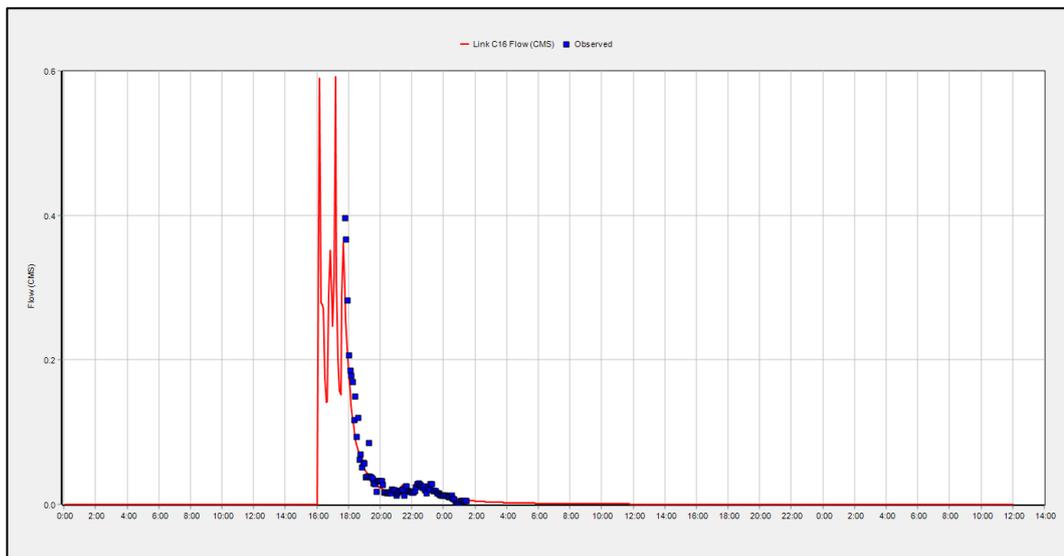
(b) .

Figura 61: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 55 (elaborazione propria).

Evento 68:



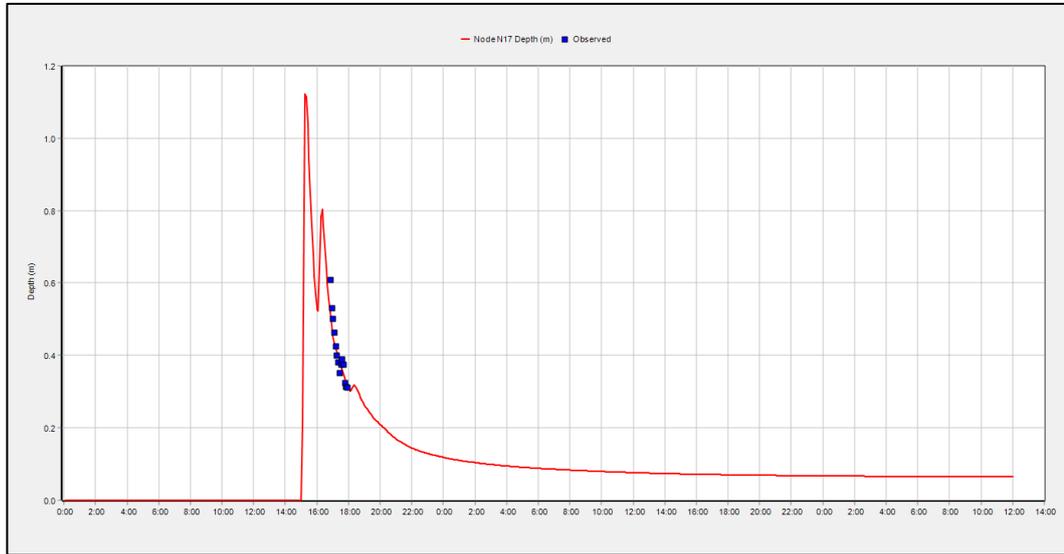
(a) .



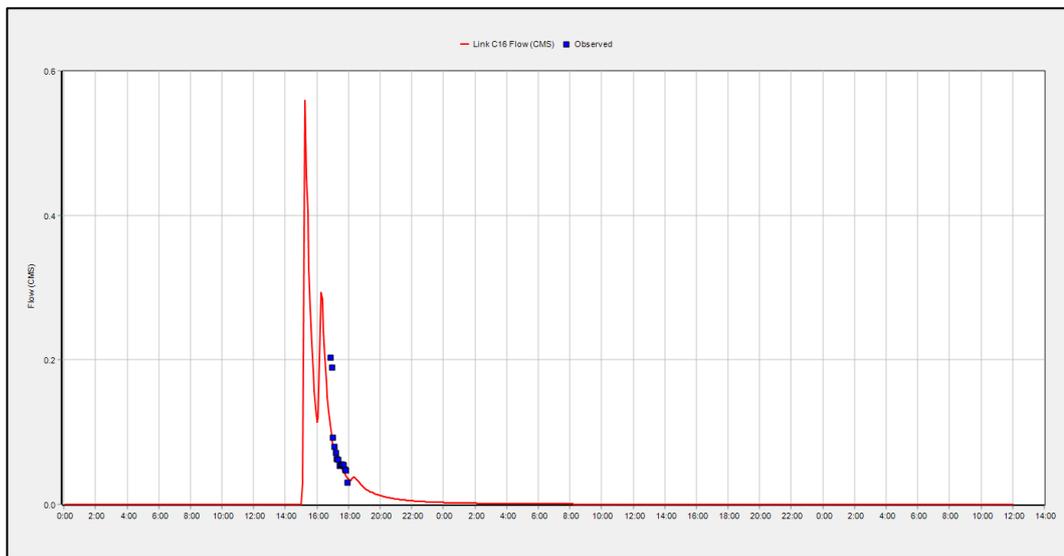
(b) .

Figura 62: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 68 (elaborazione propria).

Evento 72:



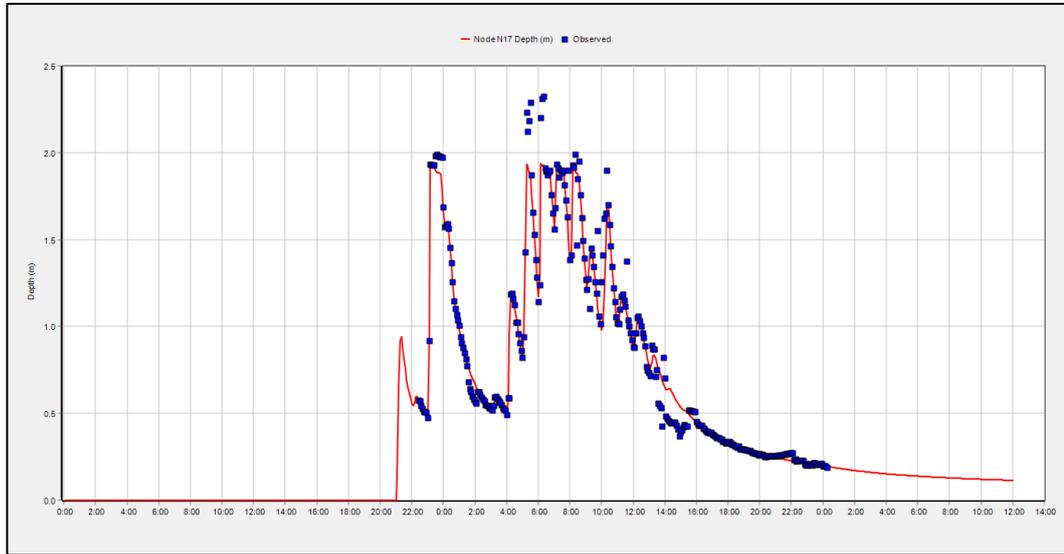
(a) .



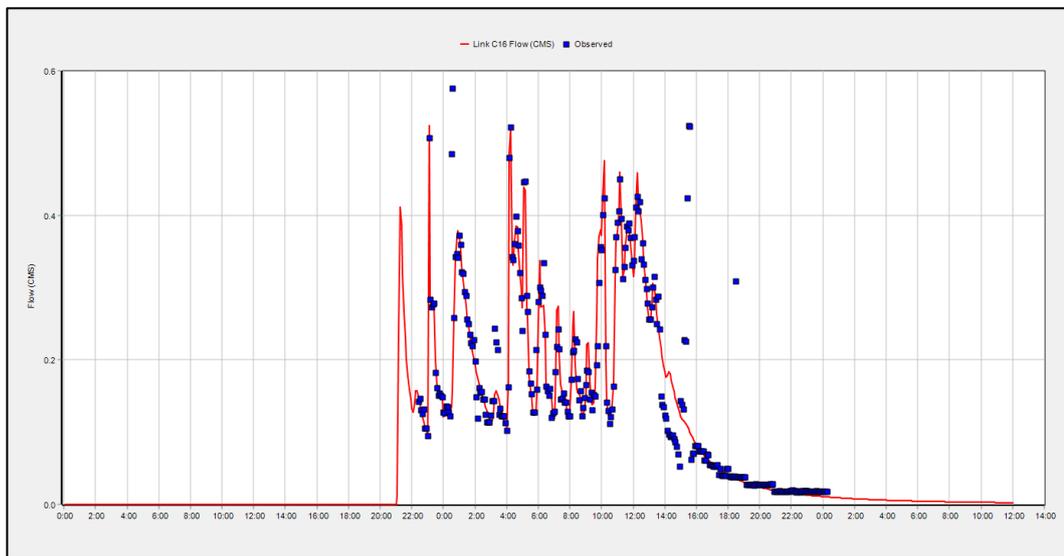
(b) .

Figura 63: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 72 (elaborazione propria).

Evento 110:



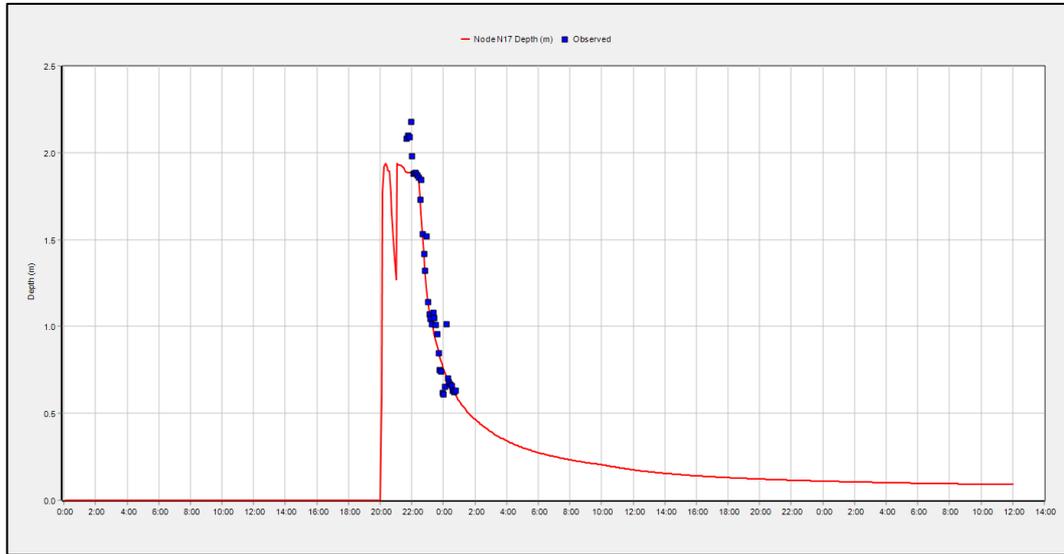
(a) .



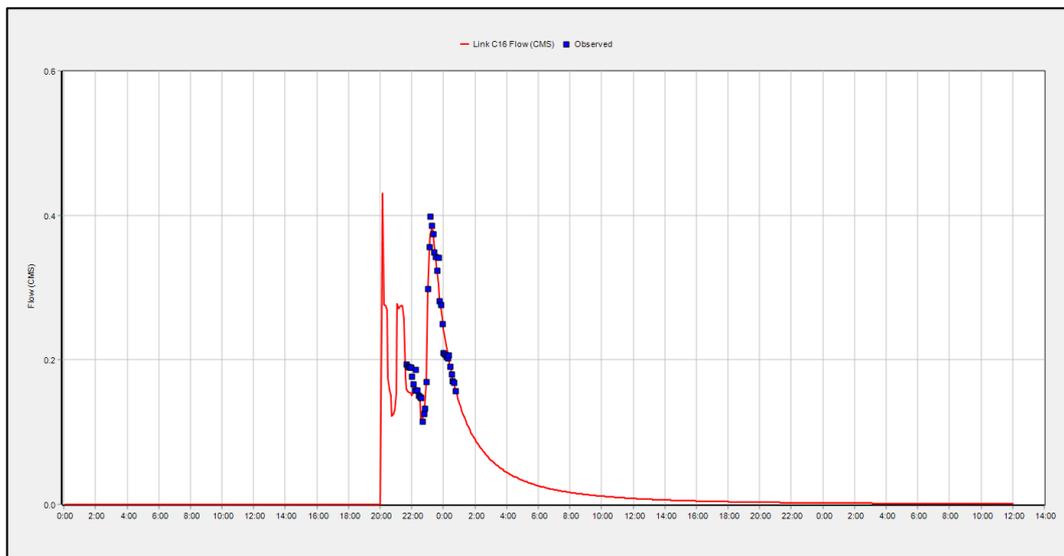
(b) .

Figura 64: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 110 (elaborazione propria).

Evento 135:



(a) .



(b) .

Figura 65: Confronto tra gli andamenti dei livelli dell'acqua simulati e osservati nel nodo N17 (a) e delle portate simulate e osservate nel collettore C16 (b) per l'evento di precipitazione 135 (elaborazione propria).

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi riguarda la verifica del modello idraulico della rete di drenaggio di Torino, in particolare del rione Borgo Dora, creato con il programma *EPA-SWMM*, modello basato sulla gestione delle acque piovane e capace di simulare il fenomeno dinamico di afflussi-deflussi.

Il lavoro sviluppato dal Prof. Fulvio Boano, dall'Ing. Stefano Losero e dal Prof. Luca Ridolfi è stato indispensabile per la realizzazione del modello idraulico, nonché il punto di partenza per lo studio condotto nel presente elaborato.

Il modello idraulico è stato realizzato in seguito all'intenso evento temporalesco abbattutosi sul capoluogo piemontese il 29 agosto 2016. Da tale evento alluvionale, si sono verificati una serie di allagamenti e problematiche che hanno interessato i residenti del quartiere Borgo Dora e le attività commerciali ubicate nello stesso.

Al fine di valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti dalle simulazioni del modello idraulico, è stato necessario realizzare l'operazione di calibrazione. Pertanto, sono stati recuperati dagli annali della banca dati meteorologica dell'*ARPA Piemonte* (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale), tutti i valori della precipitazione oraria registrati dalla stazione meteorologica di Torino localizzata in via della Consolata 10.

Dai dati acquisiti, sono state create delle serie temporali di precipitazione utilizzate, poi, per simulare il fenomeno dinamico di afflussi-deflussi sul modello della rete di drenaggio. Dalle simulazioni, sono stati ricavati i dati di portata e di livello dell'acqua all'interno del sistema di drenaggio. Inoltre, l'azienda *SMAT* ha gentilmente fornito i dati di portata e di livello registrati dal misuratore installato in prossimità dell'incrocio tra via Borgo Dora e Lungo Dora Agrigento.

L'azione di calibrazione è stata realizzata modificando i parametri della rete di drenaggio, prendendo in considerazione un singolo evento meteorico da

applicare al modello e, contemporaneamente, eseguendo un confronto tra la risposta del modello e i dati da campo registrati dal misuratore.

Per poter quantificare l'efficienza della simulazione, invece, è stata definita una funzione obiettivo che ha permesso di valutare, con estrema precisione, la differenza fra i valori osservati e quelli simulati.

I parametri modificati nel modello del sistema di scolo delle acque sono stati le scabrezze dei collettori – variando il coefficiente di *Manning* per ogni condotta, e il volume specifico di immagazzinamento dei sottobacini – agendo sul *depression storage* dei *subcatchments*.

Pertanto, poter valutare l'effettivo grado di affidabilità dei risultati ottenuti dall'operazione di calibrazione, il lavoro è proseguito attraverso la procedura di validazione del modello. In essa sono stati applicati gli altri eventi meteorici, accuratamente scelti durante la fase preliminare del lavoro, aventi intensità e durate differenti dall'evento considerato e applicato nella fase di calibrazione.

Con la validazione del modello idraulico, inoltre, sono state individuate le discrepanze nella scelta dei valori attribuiti ai parametri adottati durante l'azione di calibrazione e, successivamente, corretti al fine di ottenere la massima corrispondenza tra la risposta del modello e i dati da campo osservati dallo strumento. Tale operazione, ovviamente, è stata realizzata per tutte le serie temporali impiegate.

In conclusione, si può affermare che, nonostante il presente lavoro si sia basato su diverse ipotesi semplificative relative alla geometria dei collettori e dei manufatti della rete, si è raggiunto un buon compromesso tra l'attendibilità dei risultati ottenuti dalle simulazioni con la credibilità dei fenomeni reali.

Naturalmente, dal suddetto lavoro di tesi potranno essere condotti studi più approfonditi che, magari, porteranno a determinare dei risultati più raffinati e precisi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bruno R. (2007), Modelli per simulazioni idrologiche, idrauliche e ambientali.
- [2] Da Deppo L., Datei C. (2009), Fognature, Libreria Internazionale Cortina Padova.
- [3] Dalla Fontana G.C. (2013), Fondamenti di idrologia afflussi – deflussi: la pioggia efficace, Università di Padova.
- [4] Forneris G., Pascale M., Perosino G.C., Zaccara P. (2008), Lezioni di idrobiologia (le acque continentali), CREST (To).
- [5] Giugni M., (2018), Modelli di trasformazione afflussi-deflussi, Università Degli Studi Di Napoli Federico II.
- [6] Lewis A. Rossman, Environmental Scientist, Emeritus, U.S. Environmental Protection Agency (2015), Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.
- [7] Lewis A. Rossman, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, and Wayne C. Huber (2016), Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume I – Hydrology (Revised).
- [8] Lewis A. Rossman, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, and Wayne C. Huber (2016), Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume III – Water Quality.
- [9] Lewis A. Rossman, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, and Wayne C. Huber (2017), Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume II – Hydraulics.
- [10] Prof. Fulvio Boano, Ing. Stefano Losero, Prof. Luca Ridolfi (Settembre 2017), Rete di drenaggio in zona Borgo Dora – Analisi delle criticità e interventi migliorativi.

- [11] Tesi di laurea: Baratti E. (Università di Bologna, anno accademico 2008-2009) – Soluzioni tecniche per la realizzazione di casse di espansione nella rete di bonifica del consorzio dell'emilia centrale – Relatore: Montanari A.
- [12] Tesi di laurea: Cappuccini E. (Università di Bologna, anno accademico 2009-2010) – Applicazione di tecnologie BMP ai sistemi di drenaggio urbano – Relatore: Maglionico M.
- [13] Tesi di laurea: Carlino C. (Politecnico di Torino, anno accademico 2017-2018) – Analisi della rete fognaria mista del comprensorio territoriale Alba-Langhe-Roero afferente al depuratore di Govone (CN) – Relatore: Boano F.
- [14] Tesi di laurea: Semprini E. (Università di Bologna, anno accademico 2009-2010) – Analisi idraulica ed idrologica del bacino consorziale “Rodella” mediante modellazione di eventi meteorici significativi e del comportamento delle relative opere di difesa del suolo – Relatore: Castellarin A.
- [15] Tesi di laurea: Senette R. (Politecnico di Torino, anno accademico 2018-2019) – Modello di simulazione SWMM per le tecniche di drenaggio urbano sostenibile in zona Borgo Dora (Torino) – Relatore: Boano F.
- [16] Woods Ballard B., Wilson S., Udale-Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. (2015), The SuDS Manual, CIRIA.

SITOGRAFIA

- [1] www.annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/6864 .
- [2] www.arpa.piemonte.gov.it .
- [3] www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/relazioni-tecniche/analisi-eventi/eventi-2016/evento-temporalesco-29-30-agosto-2016 .
- [4] www.camilab.unical.it/documents/Afflussi_deflussi.pdf .
- [5] www.crestsnc.it/divulgazione/media/idropdf/testo04.pdf .
- [6] www.diceaa.univaq.it/wp-content/uploads/2018/03/5_Parte-decima-Reti-fognanti.pdf .
- [7] www.documen.site/download/parte-settima-reti-fognanti_pdf .
- [8] www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf .
- [9] www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm .
- [10] www.euromecservice.it/fognature_depressione_ita.html .
- [11] www.federica.unina.it/ingegneria/infrastrutture-idrauliche/modelli-trasformazione-afflussi-deflussi/, 2020 .
- [12] www.geoportale.comune.torino.it/web/sezioni-tematiche .
- [13] www.geoportale.piemonte.it .
- [14] www.home.deib.polimi.it/software/modelli/SWMM.pdf .
- [15] www.ilturista.info/ugc/immagini/torino/piemonte/69934 .
- [16] www.isprambiente.gov.it/files/era-net-crue/Normativa_rischio_idrogeologico_Testella.pdf .

- [17] www.isprambiente.gov.it/it/progetti/acque-interne-e-marino-costiere-1/progetto-annali .
- [18] www.legambiente.it/litalia_delle_alluvioni_studio_ultimo.pdf .
- [19] www.mistralservice.it/books/PDF/978-88-98161-19-5.pdf .
- [20] www.museotorino.it/view/s/2fb4725a68d24bc0802e32581fa6849f .
- [21] www.raccolta_depurazione_e_recupero_della_acque_usate.pdf .
- [22] www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/calamita-naturali/rapporti-sugli-eventi-alluvionali-piemonte .
- [23] www.scopriportapalazzo.com/luoghi-e-architetture/borgo-dora .
- [24] www.studiomadera.it/es/108-cn-curve-number .
- [25] www.torino.corriere.it/cronaca/19_giugno_22/torino-bomba-d-acqua-grandine-allagato-borgo-dora-75b24824-94c8-11e9-b462-499d272481c8.shtml .
- [26] www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/il-ciclo-dellacqua-water-cycle-italian?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects .
- [27] www.webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp .
- [28] www.zeroundicipiu.it/2010/01/04/cortile-del-maglio .

