

POLITECNICO DI TORINO

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

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Green garden e sistemi di drenaggio urbano sostenibile per la gestione dei cambiamenti climatici: il progetto del Laboratorio green-court-lab del Politecnico



Relatori

Prof. Fulvio Boano

Prof.ssa Stefania Tamea

Candidata

Agnese Nicoli

Luglio 2020

*Alla mia famiglia
e
A TE, ovunque tu sia*

INDICE

INTRODUZIONE	1
1 I SISTEMI DI DRENAGGIO URBANO, UNA SOLUZIONE ALLA GESTIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI	3
1.1 GLI EFFETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO	3
1.2 L'EVOLUZIONE DELLA GESTIONE DEL DRENAGGIO URBANO: L'APPROCCIO TRADIZIONALE E SOSTENIBILE.....	4
1.3 LE TECNICHE SUDS.....	7
1.3.1 RAIN GARDEN	10
2 CASO STUDIO: LABORATORIO GREEN-COURT-LAB	12
2.1 IL PROGETTO cambiamenti_climatici@polito	12
2.2 DESCRIZIONE DEL FUNZIONAMENTO DEL LABORATORIO GREEN-COURT-LAB.....	14
3 ANALISI DEI DATI DI PRECIPITAZIONE	16
3.1 CARATTERIZZAZIONE STATISTICA DEI DATI.....	17
3.1.1 Descrizione statistica	18
3.1.2 Analisi esplorativa	18
3.2 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione pluviometrica Torino Politecnico	19
3.2.1 Scala oraria.....	19
3.2.2 Scala giornaliera.....	22
3.2.3 Scala mensile.....	24
3.2.4 Scala annua	25
3.3 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione Torino Giardini Reali.....	25
3.3.1 Scala oraria.....	25
3.3.2 Scala giornaliera.....	27
3.3.3 Scala mensile.....	28
3.3.4 Scala annua	29
3.4 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione Torino via della consolata.....	30
3.4.1 Scala oraria.....	30
3.4.2 Scala giornaliera.....	31
3.4.3 Scala mensile.....	32
3.4.4 Scala annua	33
3.5 Analisi dei dati di registrati dalla Stazione Torino Buon Pastore	33
3.5.1 Scala giornaliera.....	33
3.5.2 Scala mensile.....	35
3.5.3 Scala annua	36
3.6 Analisi dei dati di precipitazione della Stazione Torino Italgas.....	36
3.6.1 3.6.1 Scala giornaliera	36
3.6.2 Scala mensile.....	38
3.6.3 Scala annua	39
3.7 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione Torino Reiss Romoli.....	39
3.7.1 Scala giornaliera.....	39
3.7.2 Scala mensile.....	40

3.7.3	Scala annua	41
3.8	Analisi dei dati di precipitazione della Stazione Torino Vallere	41
3.8.1	Scala giornaliera	41
3.8.2	Scala mensile	43
3.8.3	Scala annua	43
3.9	CONFRONTO DELLE PRECIPITAZIONI GIORNALIERE E MENSILI REGISTRATE DALLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE.....	44
3.9.1	BOX DI APPROFONDIMENTO SUI DATI ORARI E GIORNALIERI DELLA RETE METEOROLOGICA DI ARPA PIEMONTE.....	47
4	IL CODICE DI CALCOLO EPA-SWMM PER LA MODELLAZIONE NUMERICA	50
4.1	Descrizione generale del programma di calcolo	50
4.2	Modello Idrologico	51
4.3	Modello Idraulico	53
4.4	LID (Sviluppo a Basso Impatto).....	55
5	MODELLAZIONE NUMERICA DEL LABORATORIO	57
5.1	Rain gage	58
5.2	Modellazione delle coperture	59
5.3	Modellazione della pavimentazione.....	60
5.4	Modellazione del canale di raccolta	61
5.5	Modellazione dei pozzetti.....	62
5.6	Modellazione dei collegamenti	63
5.7	Modellazione delle vasche di prima pioggia e raccolta.....	63
5.8	Modellazione del sistema di pompaggio.....	65
5.9	Modellazione dello stramazzo triangolare.....	66
5.10	Modellazione del verde pensile	66
6	ANALISI DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	68
6.1	SIMULAZIONE NUMERICA PER L'ANNO UMIDO	68
6.2	SIMULAZIONE NUMERICA PER L'ANNO SECCO	73
6.3	SIMULAZIONE NUMERICA PER L'ANNO DI PRECIPITAZIONE MEDIA REGISTRATA A TORINO	77
6.4	CONFRONTO DELLE SIMULAZIONI	81
	CONCLUSIONI.....	83
	ALLEGATI	85
	ALLEGATO 1: Piante e sezioni del progetto esecutivo "Ristrutturazione spazi per la realizzazione del Laboratorio cc-green-court-lab presso la sede centrale"	85
	ALLEGATO 2: Confronto delle precipitazioni giornaliere e mensili registrate dalle stazioni pluviometriche	87
	ALLEGATO 3: Report della simulazione numerica condotta per l'anno umido	92

ALLEGATO 4: Report della simulazione numerica condotta per l'anno secco.....	94
ALLEGATO 5: Report della simulazione numerica condotta per l'anno umido	96
Bibliografia e Sitografia	98

INTRODUZIONE

I cambiamenti climatici in atto producono pesantissime conseguenze sul Pianeta e sull'uomo. L'innalzamento della temperatura media globale, l'aumento degli eventi di precipitazione estrema e di periodi siccitosi sono alcuni degli effetti provocati dai cambiamenti climatici.

I disastri ambientali provocati da tali cambiamenti hanno indotto l'uomo, gli animali e l'intero ecosistema a rimettersi in discussione e a definire nuove strategie di adattamento. Alcune specie viventi hanno visto la migrazione come unica risposta alla devastante azione dei cambiamenti; l'uomo invece, grazie alla sua abilità ingegneristica, si cimenta a definire soluzioni di adeguamento e di mitigazione degli effetti provocati dai cambiamenti climatici.

A subire l'influenza delle azioni dei cambiamenti sono anche le aree urbane, in particolare si teme che la crescente intensità e frequenza degli eventi meteorici estremi possa mettere in crisi anche i più efficienti sistemi tradizionali di drenaggio urbano. La soluzione all'inefficienza dei vecchi sistemi di drenaggio è fornita da una nuova gestione di carattere sostenibile, in particolare ci si riferisce ai sistemi di drenaggio urbano sostenibile che ha come obiettivi la gestione della quantità d'acqua che giunge sul sistema urbano come afflusso meteorico, il miglioramento della qualità dell'acqua e il suo successivo riutilizzo ed infine la creazione di ambienti urbani vivibili che aumentano la qualità di vita dell'intero ecosistema.

È su tali tematiche che si sviluppa il presente lavoro di tesi; in particolare esso si pone l'obiettivo di analizzare il funzionamento di un sistema che si occuperà di fornire soluzioni di mitigazione degli effetti e di gestione al cambiamento climatico. Il sistema in esame è un laboratorio a cielo aperto, Laboratorio green-court-lab, che sarà posizionato all'interno della sede centrale del Politecnico e che fornirà la base per l'attività di ricerca del Dipartimento DIATI nel progetto climatechange@polito.

Il Laboratorio green-court-lab è un prototipo di un sistema di gestione sostenibile delle acque meteoriche per aree urbane ed è caratterizzato da un canale di raccolta dell'acqua piovana e da una serie di infrastrutture, quali vasca di prima pioggia e vasca di raccolta. La presenza delle due vasche ha la funzione gestire i picchi di portata generati dagli eventi di pioggia. La gestione sostenibile del drenaggio urbano è definita dalla presenza di un sistema di bioritenzione che copre la vasca di raccolta e che consente la gestione della quantità dell'acqua attraverso il sistema di dreni collocato al di sotto dello strato di terreno; i dreni allontanano l'acqua e la convogliano all'interno di un pozzetto che a sua volta la convoglierà all'interno della vasca di raccolta, e consentono inoltre il miglioramento della qualità dell'acqua mediante l'azione di filtro eseguita dal suolo vegetazione.

Lo studio del funzionamento del Laboratorio green-court-lab è stato condotto mediante un'analisi preliminare delle precipitazioni cumulate orarie che sono state registrate dalle stazioni pluviometriche ARPA collocate nella città di Torino e dalla stazione meteorica presente all'interno della sede centrale del Politecnico. Tale analisi ha consentito la definizione della tipologia di eventi meteorici da simulare, ovvero si è definito il comportamento del sistema sottoposto ad un evento meteorico di grande, media e piccola portata.

All'analisi preliminare è seguita poi l'attività di modellazione del sistema attraverso l'utilizzo del codice di calcolo numerico EPA-SWMM (Storm Water Management Model - SWMM); si tratta di un programma impiegato per la pianificazione, l'analisi e la progettazione relative al deflusso delle acque meteoriche, ai sistemi di fognatura mista e nera, ai sistemi di allontanamento e laminazione delle acque meteoriche in aree urbane e non (Rossman, 2015).

Il presente lavoro di tesi si articola su sei capitoli:

- 1** delinea i sistemi di drenaggio urbano sostenibile come soluzione di gestione ai cambiamenti climatici; in particolare individua gli effetti provocati dai cambiamenti climatici, definisce l'evoluzione della gestione dei sistemi di drenaggio, presenta i sistemi di drenaggio urbano sostenibile (SuDS) e approfondisce la tecnologia delle celle di bioritenzione;
- 2** presenta il caso studio del Laboratorio green-court-lab e ne descrive il funzionamento del sistema;
- 3** contiene l'analisi delle precipitazioni cumulate orarie, giornaliere, mensili e annue, registrate dalle stazioni pluviometriche Arpa e dalla stazione meteorica presente nella sede centrale del Politecnico;
- 4** descrive il codice di calcolo numerico EPA-SWMM che viene utilizzato per la modellazione;
- 5** definisce la modellazione di tutti gli elementi che compongono il Laboratorio green-court-lab;
- 6** analizza i risultati delle simulazioni numeriche condotte dal codice di calcolo e mette a confronto i risultati;

Il presente lavoro di tesi ha contribuito alla fase progettuale del Laboratorio green-court-lab e alla verifica delle possibili criticità del sistema in caso di eventi di pioggia estremi e siccitosi.

1 I SISTEMI DI DRENAGGIO URBANO, UNA SOLUZIONE ALLA GESTIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Il 90 % delle catastrofi naturali sono dovute all'azione dell'acqua e in futuro il trend di tale valore tenderà ad aumentare in frequenza e intensità a causa del cambiamento climatico (WWAP , 2017). Tali cambiamenti hanno provocato un incremento delle alluvioni nelle aree urbane e degli eventi meteorologici estremi, a causa dei quali si è determinata la variazione del naturale ciclo idrologico. La caduta di piogge estreme sul sistema urbano produce un sovraccarico della rete di drenaggio e una conseguente difficoltà nella gestione delle risorse idriche urbane (Piro, et al., 2017).

La gestione delle acque meteoriche può essere controllata dai sistemi di drenaggio urbano sostenibile (SUDS- Sustainable urban Drainage Systems); questi ultimi risultano essere soluzioni in grado di ridurre il picco di piena dei deflussi urbani e il rischio di inondazioni, oltre ad essere efficaci come protezione da dissesto idrogeologico e come potenziamento della qualità delle acque (Masseroni, et al., 2018).

1.1 GLI EFFETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

I cambiamenti climatici hanno un effetto negativo sugli ecosistemi terrestri e causano degrado e desertificazione in gran parte del mondo. In passato, negli ultimi anni del XIX secolo, si è assistito ad un aumento della temperatura media globale; in particolare si è avuto un incremento della temperatura dell'aria di 1.53°C, registrato dal 1850-1900 fino al 2006-2005 (Shukla, et al., 2019). In futuro, nel periodo 2021-2050, è previsto un ulteriore aumento delle temperature e una riduzione delle precipitazioni.

Lo scenario dei cambiamenti climatici in Italia prevede alla fine del ventunesimo secolo un incremento della temperatura media di 5°C per l'Italia settentrionale in estate e di 3°C in inverno per l'Italia meridionale. Per le precipitazioni si avrà una riduzione del 30% in estate (Castellari S., et al., 2014) e si verificherà un incremento della loro intensità, con una riduzione totale delle stesse (Masseroni, et al., 2018).

Gli effetti provocati dall'azione dei cambiamenti climatici si possono riassumere nella tabella proposta dalle "Linee guida sull'adozione di tecniche di drenaggio urbano sostenibile per una città più resiliente ai cambiamenti climatici" (Bank, et al., Aprile 2018).

Tabella 1.1: Effetti dell'azione di pioggia intensa dovuta ai cambiamenti climatici (Bank, et al., Aprile 2018)

<p style="text-align: center;">Allagamento superficiale</p> <p>Le acque di runoff, se non drenate in modo efficace, possono comportare allagamenti di aree urbane anche per eventi di pioggia modesti</p>	
<p style="text-align: center;">Allagamento delle fognature</p> <p>Se le acque drenate dalla fognatura eccedono la sua capacità di deflusso, le fognature risultano sovraccaricate e, andando in pressione, possono causare allagamenti superficiali</p>	
<p style="text-align: center;">Allagamento aree fluviali</p> <p>Il drenaggio artificiale dell'area urbana comporta un aumento dei picchi di piena nei corsi d'acqua dovuti agli scarichi di acque di runoff, facilitando l'allagamento di aree fluviali a valle</p>	

<p style="text-align: center;">Erosione</p> <p>Le acque scaricate dalla fognatura nei corpi idrici fluviali hanno velocità molto elevate che possono causare erosione, cambiando la configurazione morfologica del corso d'acqua con effetto diretto sugli habitat acquatici del fiume</p>	
<p style="text-align: center;">Inquinamento</p> <p>Le acque drenate dalle reti fognarie veicolano il carico inquinante accumulato nel periodo secco sulla superficie impermeabile e lo scaricano non trattato nei corpi idrici contribuendo alla riduzione della qualità delle acque degli stessi. L'effetto risulta ancora maggiore nel caso di fognature miste, per via dello scarico di acque reflue miste non trattate per mezzo degli scolmatori di piena</p>	

L'aumento di eventi meteorici estremi provoca il superamento della capacità dei sistemi di drenaggio urbano, causando un impatto devastante sulle aree urbane (Figura 1.1) a causa di pericolose inondazioni (Forestieri A, et al., 2018). L'aumento delle portate e dei volumi di deflusso in ambito urbano può riferirsi a:

- l'aumento dell'intensità di precipitazione a causa dei fenomeni di cambiamento climatico;
- l'aumento dell'impermeabilizzazione dovuto all'urbanizzazione.



Figura 1.1: Alluvione Novembre 2016 in Piemonte (ARPA, Regione Piemonte)

1.2 L'EVOLUZIONE DELLA GESTIONE DEL DRENAGGIO URBANO: L'APPROCCIO TRADIZIONALE E SOSTENIBILE

Il cambiamento climatico e il conseguente impatto negativo sul sistema urbano hanno provocato la necessità di revisionare la progettazione dei sistemi di drenaggio nelle città (Zhou, 2014) .

La struttura di una rete fognaria è caratterizzata da un insieme di condotte collettrici estese sul territorio da servire. Le condotte definiscono un sistema di raccolta dalle superfici scolanti e di trasporto verso un punto di recapito, generalmente un depuratore, per poi rilasciarle all'interno del ricettore finale (Da Deppo L., et al., 2009).

Il termine di sistema di drenaggio urbano si è sviluppato da tempo e consente di limitare l’impatto ambientale che la qualità (fognature nere) e la quantità (fognature bianche) delle acque hanno sui corpi idrici ricettori.

In passato la gestione del sistema di drenaggio urbano è stata affidata ad un approccio tradizionale, che prevedeva la raccolta e il convogliamento ai depuratori sia delle acque reflue sia del deflusso proveniente dalle acque meteoriche che precipitavano sul sistema urbano (Masseroni, et al., 2018).

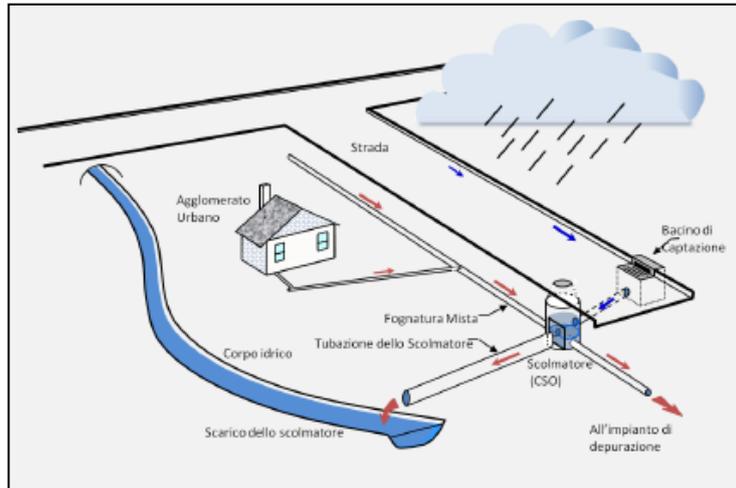


Figura 1.2: Rappresentazione del sistema di drenaggio urbano (Gibelli G., 2015)

Ai depuratori giunge un quantitativo di portata limitata che è compatibile con l’efficienza dell’impianto. Durante eventi di pioggia estremi si raggiunge la massima capacità dell’impianto e una porzione degli scarichi fognari viene sversata nel corpo idrico ricettore. Le reti fognarie esistenti hanno mostrato in più occasioni di avere funzionamento insufficiente, con gravi disagi nei centri abitati. Con lo sviluppo di aree urbane si è avuto un aumento delle portate in rete e un’insufficienza delle reti stesse ad accoglierle (Da Deppo L., et al., 2009).

L’urbanizzazione e il suo effetto sull’impermeabilizzazione dei suoli provoca un’alterazione del naturale ciclo idrologico. La Figura 1.3 mostra come l’effetto dell’urbanizzazione è causa di un aumento del deflusso superficiale del 35 % rispetto alla condizione che si verifica quando si ha a che fare con un terreno vegetato e di una riduzione di infiltrazione ed evapotraspirazione (Gibelli G., 2015).

L’impermeabilizzazione dei suoli provoca:

- un’intensificazione dei fenomeni alluvionali;
- una riduzione dell’infiltrazione d’acqua;
- un incremento del deflusso superficiale, con aumento dell’azione erosiva del suolo, del trasporto solido e dell’inquinamento delle acque (Gibelli G., 2015).



Figura 1.3: Effetto dell’urbanizzazione sul ciclo dell’acqua (Gibelli G., 2015)

L'effetto dell'urbanizzazione a causa della rimozione di aree vegetate, che hanno il compito di intercettare, rallentare il deflusso meteorico, produce un aumento della velocità di scorrimento dell'acqua in superficie. La Figura 1.4 illustra gli impatti dell'urbanizzazione su un bacino idrografico riducendo la sua permeabilità e aumentando il deflusso delle acque superficiali (Woods Ballard, et al., 2015).

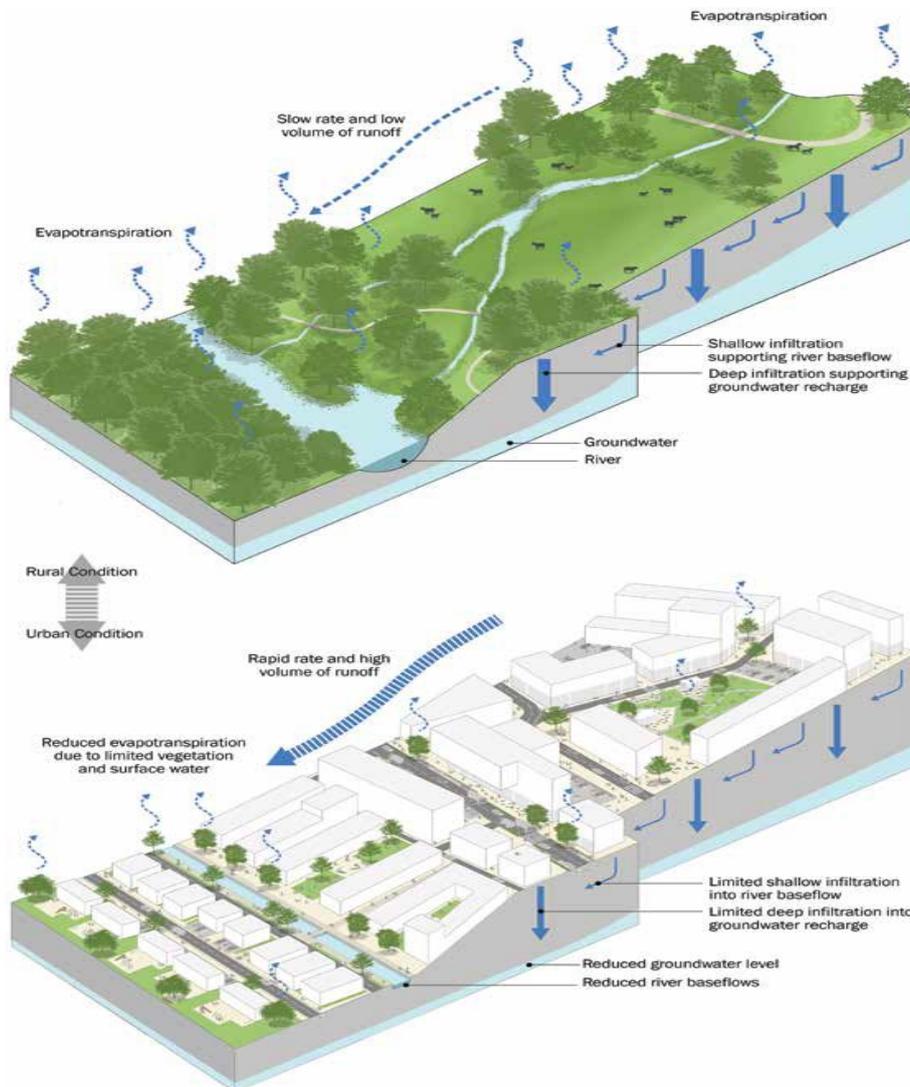


Figura 1.4 Impatti dell'urbanizzazione su un bacino di utenza (Woods Ballard, et al., 2015)

Nell'approccio di gestione tradizionale dei sistemi di drenaggio, quando si raggiunge la capacità massima dell'impianto si ha l'attivazione di scaricatori di piena che trasportano il quantitativo d'acqua in eccesso verso i corpi idrici ricettori. Per tale motivo è prevista l'installazione di vasche di prima pioggia che consentono di immagazzinare un quantitativo d'acqua minimo e applicano un primo processo di trattamento su di esse. A tali vasche si deve accompagnare l'impiego di vasche di raccolta, che consentono la riduzione del picco di portata prima che l'acqua giunga nel ricettore finale (Masseroni, et al., 2018).

La gestione tradizionale di drenaggio mostra delle problematiche nella definizione di soluzioni concrete, con costi limitati ed efficienti anche a seguito dell'azione dei cambiamenti climatici che mettono a dura prova anche sistemi di drenaggio all'avanguardia (Masseroni, et al., 2018).

Da pochi anni si è sviluppata una tipologia di gestione del sistema di drenaggio che è stata definita come "gestione sostenibile delle acque pluviali", il cui obiettivo è la laminazione delle portate

all'interno delle reti di drenaggio e la riduzione della quantità del deflusso che ve ne giunge. Nella gestione sostenibile delle acque pluviali ci si riferisce al concetto di invarianza idraulica ed idrologica, dove i volumi di deflusso e la portata di piena proveniente dal drenaggio devono rimanere gli stessi prima e dopo la trasformazione dell'uso del suolo. Per raggiungere tale condizione il runoff deve essere gestito mediante le misure di riduzione e rallentamento (Masseroni, et al., 2018).

Tra gli obiettivi di gestione sostenibile dei deflussi meteorici si hanno:

- “ridurre i deflussi superficiali;
- alleggerire i collettori di fognatura e gli impianti di trattamento;
- ridurre i carichi idraulici concentrati sui corsi d'acqua naturali e i canali di bonifica, costituenti i recipienti terminali delle reti di fognatura;
- incrementare il ravvenamento locale delle falde acquifere sotterranee;
- migliorare il microclima urbano incrementando l'evaporazione (Figura1.5);
- conservare e ripristinare, nei limiti del possibile, la funzione naturale del suolo (Masseroni, et al., 2018)”.



Figura 1.5: SuDS con processi naturali (Woods Ballard, et al., 2015)

Per raggiungere tali obiettivi sarà necessario prevenire la formazione dei deflussi superficiali, ridurre le superfici impermeabili, attuare misure di percolazione delle acque piovane e realizzare vasche di raccolta in grado di ridurre il picco di piena in ambito urbano (Masseroni, et al., 2018).

Le soluzioni adottate dall'approccio di gestione sostenibile del drenaggio urbano sono definite dall'acronimo “LID - Low Impact Development”, “SuDS - Sustainable Urban Drainage Systems” o “NWRM - Natural Water Retention Measures”, a seconda dei diversi gruppi di ricerca che le hanno studiate (Fletcher, et al., 2015).

1.3 LE TECNICHE SUDS

Per sistema di drenaggio urbano sostenibile si intende “il sistema di gestione delle acque meteoriche urbane, costituito da un insieme di strategie, tecnologie e buone pratiche volte a ridurre i fenomeni di allagamento urbano, a contenere gli apporti di acque meteoriche ai corpi idrici ricettori mediante il

controllo alla sorgente delle acque meteoriche e a ridurre il degrado qualitativo delle acque. (Masseroni, et al., 2018)”.

La progettazione dei SuDS si basa:

- sulla gestione del deflusso superficiale;
- sulla gestione dell'acqua piovana nelle zone in cui essa precipita;
- sulla riduzione degli effetti dell'impermeabilizzazione che causano un aumento del rischio idraulico;
- sul miglioramento della qualità delle acque, trattando il deflusso per prevenire la contaminazione provocata dal carico inquinante;
- sul miglioramento del microclima urbano (Woods Ballard, et al., 2015).

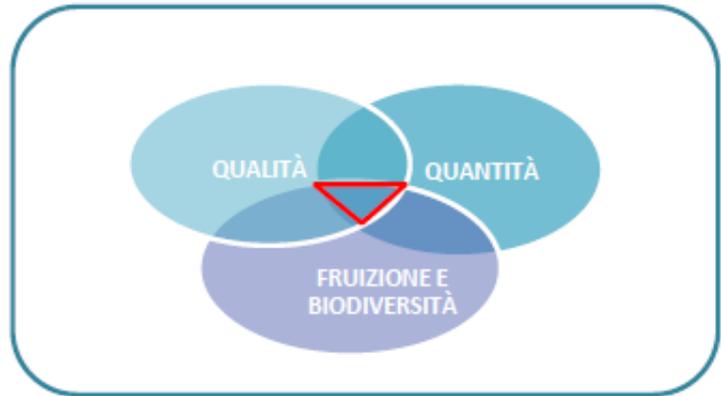


Figura 1.6: GESTIONE SOSTENIBILE DELLE ACQUE URBANE (Gibelli G., 2015)

La filosofia dei sistemi di drenaggio sostenibili consiste nel massimizzare i benefici e minimizzare gli impatti negativi del deflusso delle acque superficiali dalle aree sviluppate. L'approccio SuDS comporta il rallentamento e la riduzione della quantità di deflusso delle acque superficiali (Woods Ballard, et al., 2015).

Le tecnologie SuDS sono in grado di ridurre i deflussi meteorici agendo su:

- Infiltrazione: l'infrastruttura verde ha la funzione di aumentare la capacità filtrante del sottosuolo e le acque accumulate vengono smaltite mediante i processi di infiltrazione, evaporazione.
- Detenzione: i deflussi vengono invasati e rilasciati a valle, con portata limitata. Il volume invasato è trattenuto in maniera temporanea e a seguito del passaggio dell'onda di piena verrà poi rilasciato.
- Trasporto: i deflussi provenienti dall'area scolante possono essere deviati per ridurre la portata a valle.
- Riutilizzo: alcune infrastrutture verdi consentono l'accumulo e il successivo riutilizzo dell'acqua (Masseroni, et al., 2018).

I principi base su cui si basano i LID sono:

1. Water Quantity: controlla la quantità d'acqua mediante la gestione del rischio idraulico e la salvaguardia del naturale ciclo dell'acqua. I sistemi SuDS sono progettati per gestire la quantità d'acqua riducendo il rischio di allagamenti, dovuto all'aumento dell'urbanizzazione. I criteri che vengono utilizzati per la gestione della quantità d'acqua sono:
 - Utilizzare il deflusso meteorico come risorsa. Una parte dei deflussi provenienti da afflussi meteorici viene immagazzinata o fatta infiltrare per ricaricare le falde acquifere. Le piogge diventeranno una maggiore risorsa in futuro, quando l'azione dei cambiamenti climatici (con l'innalzamento delle temperature) e dell'aumento demografico renderà il reperimento di questo bene difficile. Perciò l'acqua meteorica può essere utilizzata per l'irrigazione, per il lavaggio delle auto o per lo scarico dei servizi igienici.I sistemi di accumulo dell'acqua piovana possono essere collocati sul tetto, o all'interno di spazi interrati.

- Sostenere la gestione del rischio di inondazione e proteggere la morfologia e l'ecologia delle acque superficiali riceventi
 - Conservare e proteggere i sistemi idrologici naturali del sito
 - Drenare il sito in modo efficace: il deflusso provocato da eventi meteorici dovrà infiltrarsi nel terreno o dovrà essere captato da tecnologie SuDS dotati di dreni che saranno in grado di allontanare l'acqua.
 - Gestire il rischio di inondazione: il deflusso di eventi piovosi che superano la capacità dei SuDS dovrà essere gestito all'interno di aree di stoccaggio.
 - Progettazione del sistema per far fronte ai cambiamenti futuri: le tecnologie SuDS sono progettate per includere l'azione del cambiamento climatico (Woods Ballard, et al., 2015).
2. Water Quality: gestisce la qualità del deflusso per prevenire l'inquinamento. Un altro importante criterio su cui si basano le tecnologie SuDS è quello relativo alla qualità dell'acqua. Con tale criterio ci si propone di:
 - prevenire l'inquinamento: impedire che gli agenti inquinanti si mescolino con il deflusso delle acque meteoriche;
 - intercettare i carichi inquinanti: la presenza aree di stoccaggio e di zone vegetate che intercettano l'afflusso meteorico producono una prima azione di trattamento;
 - eseguire processi di trattamento: alcune tecnologie SuDS sono dotate di componenti in grado di trattare l'azione inquinante presente nei deflussi superficiali (Woods Ballard, et al., 2015).
 3. Amenity: creare spazi multifunzionali che aumentano il benessere dell'uomo. L'amenità è definita come la capacità di rendere "una struttura o un servizio utile o piacevole". La progettazione dei SuDS tiene conto del criterio di amenità per fornire ambienti urbani attraenti, piacevoli, vivibili, che sostengano e valorizzino l'ambiente circostante. (Woods Ballard, et al., 2015).
 4. Biodiversity: creare e promuovere strutture naturali (Woods Ballard, et al., 2015).

Tra le diverse tipologie di SuDS (Figura 1.7) è possibile definire:

- sistemi di raccolta dell'acqua piovana: come cisterne e serbatoi che consentono la raccolta dell'acqua e il successivo riutilizzo; l'accumulo dell'acqua;
- tetti verdi: costituiscono dei sistemi dove l'acqua viene immagazzinata nello strato di terreno e assorbita dalla vegetazione;
- Sistemi di infiltrazione: consentono la raccolta e l'immagazzinamento del deflusso;
- Sistemi di trattamento brevettato: si tratta di strutture sotterranee che sono progettate per fornire il trattamento dell'acqua attraverso la rimozione degli inquinanti;
- Swales: si tratta di un canale vegetato che consente di trasportare ed effettuare una prima trattazione al deflusso;
- Sistemi di bioritenzione: si tratta di una depressione vegetata che consente il deflusso e il temporaneo deposito in superficie delle acque superficiali;
- Alberi: possono essere utilizzati come elementi aggiuntivi alle tecnologie SuDS per migliorare la loro capacità filtrante, oppure utilizzati come elementi a sé stanti per raccogliere e immagazzinare le acque, fornendone il loro trattamento;
- Pavimenti permeabili: si tratta di blocchi di pavimentazione con spazi vuoti o pavimentazioni porose dove l'acqua filtra attraverso il blocco stesso. L'acqua può essere immagazzinata alla base e successivamente può infiltrarsi nel terreno;
- Serbatoi di attenuazione: si tratta di serbatoi sotterranei che sono utilizzati per immagazzinare temporaneamente il deflusso prima del rilascio controllato o dell'utilizzo;

- Bacini di detenzione: a seguito di un evento piovoso, il deflusso si riversa in una depressione dove la presenza di uno sbocco limita i flussi, in modo da fornirne l'attenuazione. Tali bacini sono asciutti, La presenza di vegetazione fungerà da filtro per il deflusso e ne consentirà il trattamento;
- Stagni e zone umide: una pozza d'acqua permanente può essere utilizzata per fornire il trattamento del deflusso, gestendo l'azione dei flussi in uscita. Possono sostenere la vegetazione emergente e sommersa lungo il loro litorale e nelle zone paludose e poco profonde, migliorando in tal modo i processi di trattamento e la biodiversità (Woods Ballard, et al., 2015).

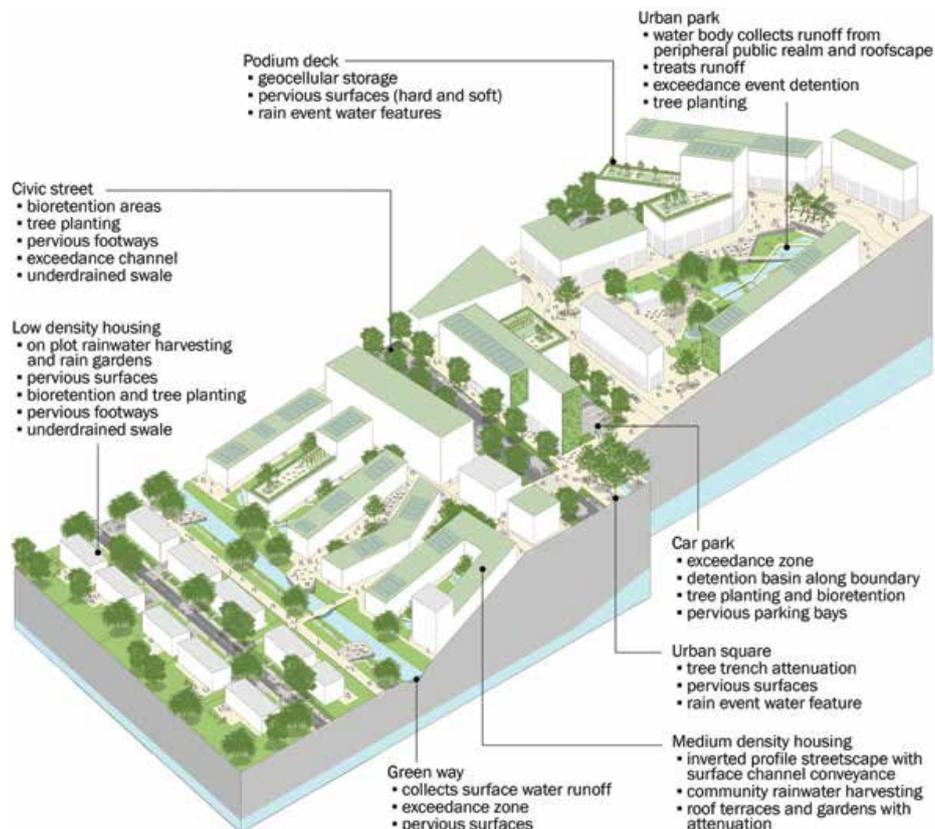


Figura 1.7: Tipologie di SuDS su un'area urbana (Woods Ballard, et al., 2015)

Di seguito verrà approfondita la tecnologia SuDS dei rain garden di cui si caratterizza il sistema di drenaggio urbano sostenibile del caso studio in esame.

1.3.1 RAIN GARDEN

I Rain garden sono una tecnologia innovativa dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile (SuDS) e hanno l'obiettivo di ridurre la quantità del deflusso superficiale e migliorare la qualità delle acque meteoriche. I rain gardens sono sistemi di BIORITENZIONE. Tali sistemi sono delle depressioni vegetate che hanno capacità di auto-irrigazione, di ricreare habitat e biodiversità nei centri urbani. Le celle di bioritenzione sono in genere utilizzate per gestire eventi meteorici frequenti. Il deflusso presente sulla superficie viene temporaneamente immagazzinato e successivamente filtrato dal terreno sottostante che funge come mezzo poroso, in grado di migliorare le prestazioni del sistema. Al di sotto dello strato di terreno sono presenti i dreni, che si occupano di allontanare dal sistema l'acqua che viene filtrata. Una parte del deflusso verrà persa per evapotraspirazione, a causa della presenza della vegetazione (Woods Ballard, et al., 2015).

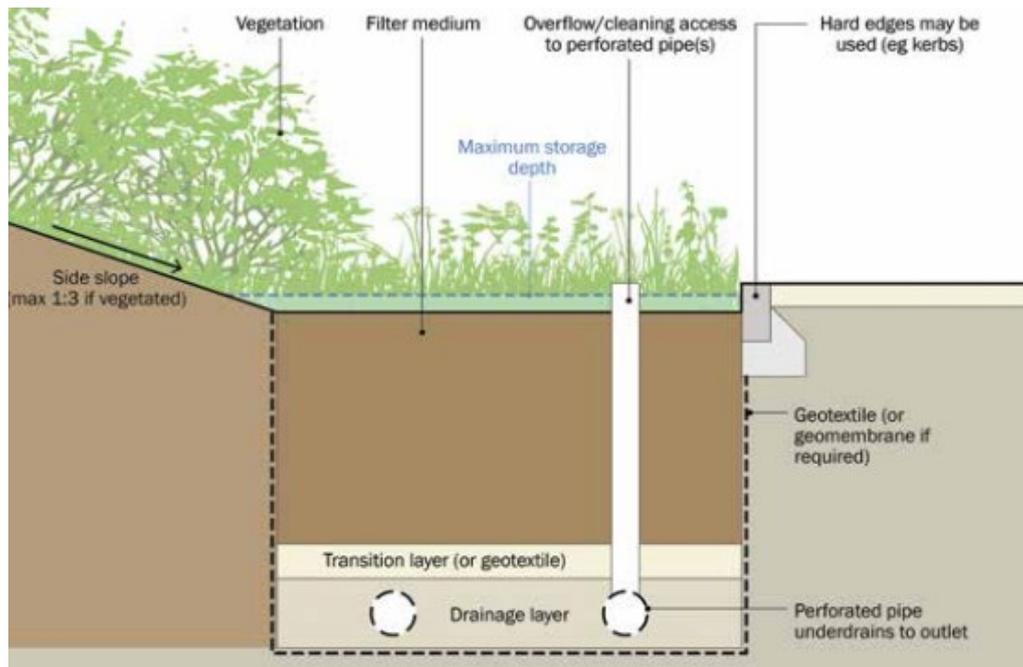


Figura1.8: Componenti principali di un sistema di bioritenzione (Woods Ballard, et al., 2015)

Generalmente la profondità di stoccaggio offerta dalle celle di bioritenzione è di 150-300mm. La vegetazione consente l'assorbimento degli inquinanti, facilita i processi fisici e chimici nel terreno, la permeabilità del mezzo filtrante e previene l'erosione degli strati superficiali del suolo. Il sistema di celle è caratterizzato di terreno filtrante, generalmente sabbia, che consente di filtrare gli inquinanti e controllare la velocità con cui l'acqua si infila. La profondità del terreno filtrante è generalmente pari a 750-1000 mm (è consigliabile avere una profondità minima di 400 mm). Lo strato intermedio, tra il terreno filtrante e i dreni, è definito strato di transizione, di profondità minima 100 mm e generalmente costituito da uno strato di geotessile. I dreni sono collocati nello strato inferiore allo strato di transizione e hanno l'obiettivo di raccogliere l'acqua filtrata dal mezzo filtrante. La profondità dello strato è definita dal diametro del tubo. In generale, la copertura delle tubazioni, realizzata con ghiaia, è di 50 mm per evitare l'ingresso di materiale fine nel tubo (Woods Ballard, et al., 2015).

I sistemi di bioritenzione consentono la riduzione del picco di portata, definendo un minimo volume di stoccaggio. Quando si verificano eventi meteorici di grande portata, sarà necessario una tubazione di troppopieno sopra per convogliare a valle i flussi in eccesso (Woods Ballard, et al., 2015).

La qualità dell'acqua è tenuta in conto dai sistemi attraverso l'esecuzione di trattamenti, come quello della rimozione dei sedimenti (soprattutto i sedimenti fini) e degli inquinanti (come i nutrienti) grazie alla presenza della vegetazione di superficie. I sistemi di bioritenzione tengono conto del criterio di amenità delle tecnologie SuDS, in quanto forniscono un'architettura paesaggistica e creano dei benefici al microclima locale raffreddando l'aria attraverso l'evapotraspirazione. Il principio di biodiversità su cui si basano le tecnologie SuDS è considerato nella progettazione dei sistemi attraverso la valorizzazione delle aree urbane (Woods Ballard, et al., 2015).



Figura 1.9: Esempi di giardini pluviali in Cheltenham (Woods Ballard, et al., 2015)

I sistemi di bioritenzione richiedono una manutenzione regolare per garantire il funzionamento continuo. Le problematiche legate a tali sistemi sono dovute all'intasamento della superficie, spesso la manutenzione dei dreni è difficile da realizzare e viene ignorata. L'intasamento degli strati superficiali o di drenaggio può causare dei problemi al trattamento delle acque. Generalmente durante i primi mesi dopo la realizzazione delle celle di bioritenzione occorre eseguire un'ispezione dopo l'accadimento di eventi piovosi (Woods Ballard, et al., 2015).

2 CASO STUDIO: LABORATORIO GREEN-COURT-LAB

Il presente lavoro di tesi analizza il funzionamento di un sistema che si occuperà di fornire soluzioni di mitigazione e di gestione al cambiamento climatico. Il sistema in esame è un laboratorio a cielo aperto, Laboratorio green-court-lab, che sarà posizionato all'interno della sede centrale del Politecnico e si sviluppa come attività di ricerca del Dipartimento DIATI nel progetto climatechange@polito.

2.1 IL PROGETTO cambiamenti_climatici@polito

Il laboratorio a cielo aperto si colloca all'interno del progetto cambiamenti_climatici@polito. Si tratta di un'attività di ricerca e sviluppo che applica la scienza dell'ingegneria per creare nuove soluzioni ai cambiamenti climatici in atto (DIATI).

Il progetto di ricerca nasce all'inizio del 2018, quando l'Agenzia nazionale di valutazione del sistema universitario e della ricerca (ANVUR) nomina il DIATI con la qualifica di Dipartimento di Eccellenza (DIATI).

L'obiettivo del progetto cambiamenti_climatici@polito (cc@polito) è quello di "qualificare il DIATI come punto di riferimento tecnico, scientifico e formativo internazionale per l'analisi e il contrasto degli effetti del cambiamento climatico sul territorio, con particolare riferimento a:

- strategie innovative di monitoraggio e analisi del cambiamento;
- mitigazione dei cambiamenti mediante una approfondita analisi delle tecnologie negative e del ciclo delle risorse e dei materiali nella loro filiera complessiva, dall'estrazione al loro impiego, con conseguenti emissioni o re-immissioni in ambiente;
- soluzioni tecnologiche e di pianificazione per l'adattamento ai cambiamenti climatici.

S'intendono altresì analizzare le reti che in tale processo sono coinvolte, per estrazione e distribuzione delle risorse aria ed acqua, per lo spostamento dei flussi di persone, materiali o cibo, nonché per l'utilizzo del suolo e sottosuolo" (DIATI).

L'attività di ricerca, che ha l'obiettivo di sviluppare soluzioni di adattamento al cambiamento climatico, è caratterizzata da un laboratorio "integrato e multisito" (Figura 2.1), costituito da:

1. "un laboratorio fisso (cc-core-lab) situato nel Politecnico, dotato di:
 - una sala di controllo per l'elaborazione e la diffusione dei dati provenienti da altri siti;
 - una sala attrezzata con simulatore di pioggia che consenta di riprodurre intensità di precipitazione prefissate (anche molto intense);
 - una sala a temperatura controllata, con range $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$: $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ per valutare l'effetto dei cicli gelo disgelo e delle temperature estreme sui suoli e sulle pavimentazioni stradali;
 - una sala attrezzata per lo sviluppo di prototipi di nuove tecnologie per l'ottimizzazione energetica e la mitigazione di gas serra;
 - una sala dedicata alla valutazione delle potenzialità per i fini della mitigazione dei cambiamenti climatici di tecnologie per il trattamento delle acque con energie rinnovabili, in collaborazione con il "Laboratorio di chimica ambientale" del DIATI ed il CleanWaterCenter@PoliTo (DIATI)".
2. "un laboratorio a cielo aperto (cc-green-roof-lab) situato nel Politecnico, dedicato a tecnologie basate su tetti, pareti e superfici verdi;
3. un laboratorio mobile (cc-moving-lab) per il controllo e il monitoraggio del cambiamento climatico;
4. un laboratorio in grotta (cc-paleo-lab) per lo studio del paleoclima;
5. un laboratorio su ghiacciaio (cc-glacier-lab) per lo studio della evoluzione delle masse glaciali (DIATI)".

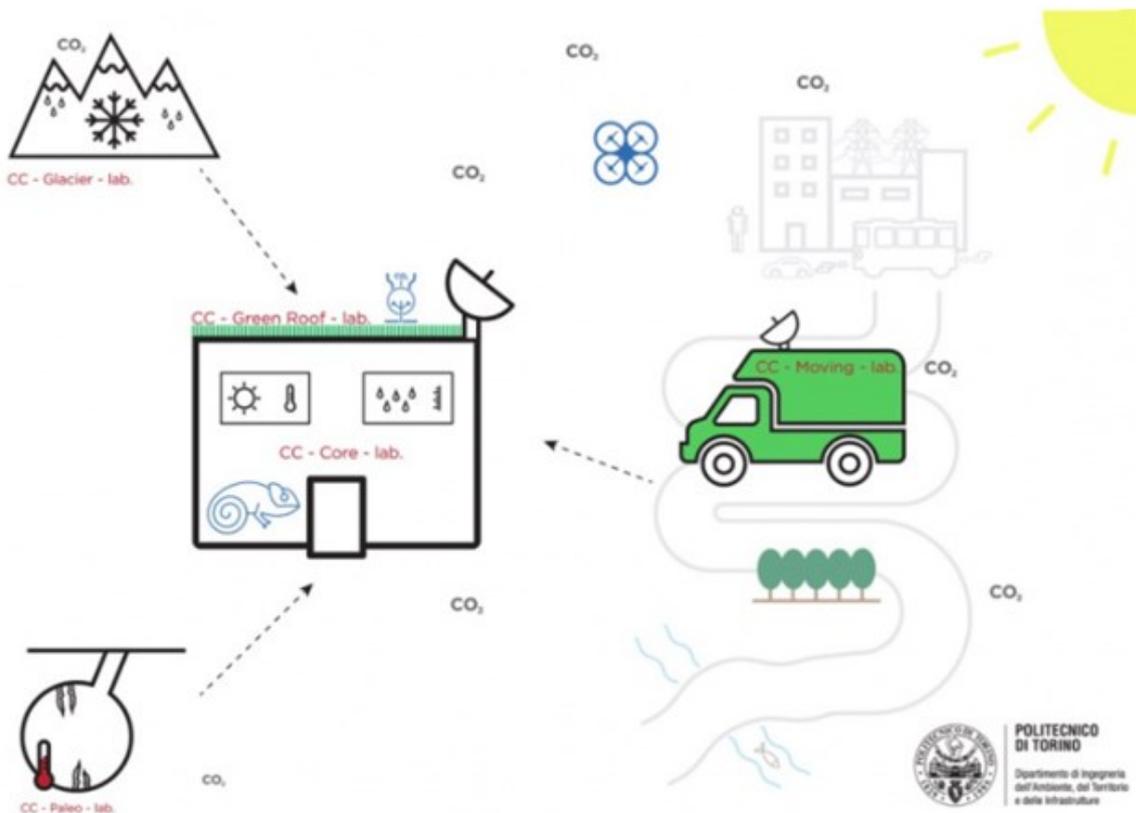
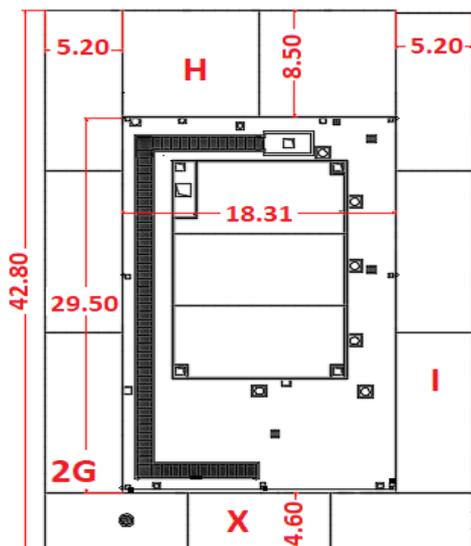


Figura 2-1: Schematizzazione del laboratorio integrato e multisito (DIATI)

2.2 DESCRIZIONE DEL FUNZIONAMENTO DEL LABORATORIO GREEN-COURT-LAB

Il laboratorio a cielo aperto, che si caratterizza di tecnologie che forniscono delle soluzioni alla mitigazione degli effetti del cambiamento climatico, è posizionato all'interno del cortile del Laboratorio



di idraulica del Politecnico (Figura 2.2). Il sistema consentirà la misurazione di variabili meteoriche, l'analisi della quantità e qualità delle acque meteoriche e il controllo e la gestione dei flussi filtranti. Il laboratorio è definito dagli edifici 2G (DIP Idraulica/Energetica), H (laboratorio di Idraulica), I (DIP Strutture), X (corridoio Bar), e ha una dimensione di 29.50 x 18.31 m. I tetti dei dipartimenti (I e 2G), a due falde, misurano considerando una sola falda 42.80 x 5.20 m. La copertura piana tra i due dipartimenti (H), misura 8.50 x 18.31 m. La parte piana soprastante il corridoio del Bar è larga 4.60 m. L'area oggetto d'esame si estende per una superficie totale di 1217 m².

Tabella 2.1: Valori delle aree da considerare per il Laboratorio

Struttura	Superficie
Cortile (da muro a muro)	535 m ²
Copertura dei dipartimenti (2G e I)	396 m ²
Copertura piana (H)	154 m ²
Copertura piana (X)	132 m ²
Totale aree	1217 m ²

Il Laboratorio è un prototipo di un sistema di gestione sostenibile delle acque meteoriche per aree urbane e si caratterizza di un canale di raccolta dell'acqua piovana e di una serie di strutture idrauliche, quali vasca di prima pioggia e vasca di raccolta. La presenza delle due vasche ha la funzione di ridurre i picchi di portata in rete. La gestione sostenibile del drenaggio urbano è definita dalla presenza di un sistema di bioritenzione che copre la vasca di raccolta e che consente la gestione della quantità dell'acqua attraverso il sistema di dreni collocato al di sotto dello strato di terreno che allontanano l'acqua e la convogliano all'interno di un pozzetto che a sua volta la convoglierà all'interno della vasca di raccolta e consentono il miglioramento della qualità dell'acqua mediante l'azione di filtro eseguita dalla vegetazione.

I meccanismi che verranno valutati dalla realizzazione del laboratorio sono:

- “inerzia termica e raffreddamento evaporativo forniti dalla vegetazione;
- riduzione del consumo di elettricità e dei combustibili utilizzati per il condizionamento ed il riscaldamento degli edifici;
- riduzione dell'impatto degli eventi di pioggia estrema, che vengono simulati mediante la presenza dei simulatori di pioggia;
- azione combinata del filtro dovuto ai substrati di terreno e al ciclo vitale delle piante per la depurazione delle acque meteoriche e dell'aria;
- sperimentazione dell'uso di muri verdi per il trattamento delle acque grigie (provenienti da lavandini, docce, lavatrici)” (DIATI).

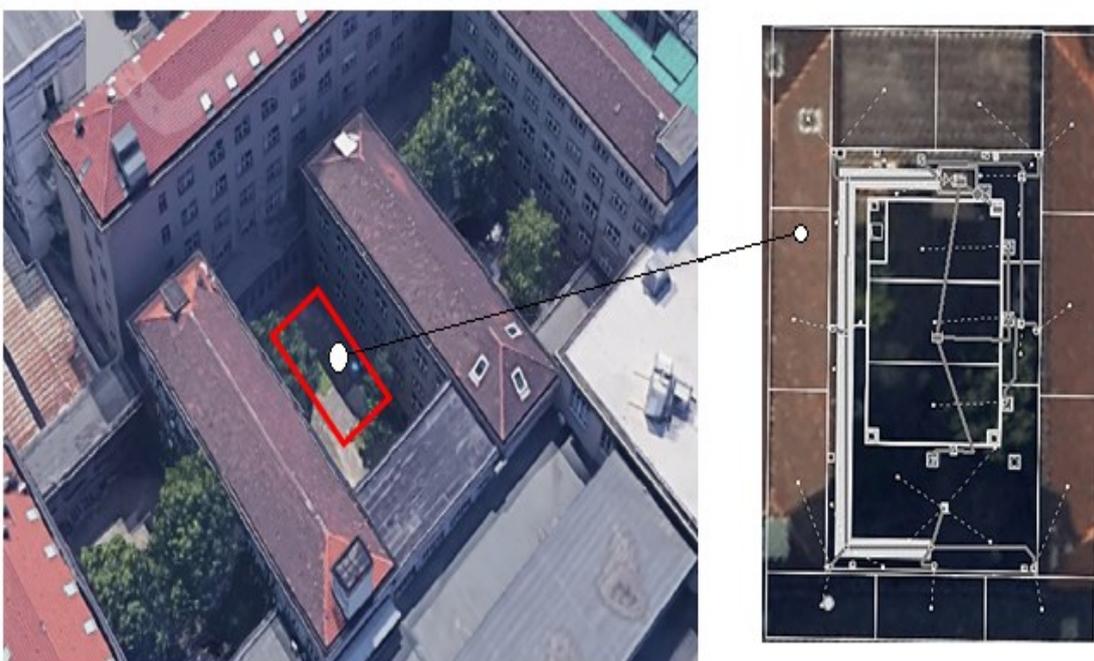


Figura 2-2: Ortofoto rappresentativa della collocazione del Laboratorio green-court-lab

Il laboratorio consentirà la gestione di un sistema di drenaggio urbano sostenibile, il cui funzionamento (Figura 2.3) è collegato al sistema di allontanamento dell'afflusso meteorico. L'allontanamento delle acque meteoriche che cadono sul Laboratorio a cielo aperto avviene attraverso un sistema costituito da pluviali, pozzetti, caditoie, un canale a cielo aperto dotato di griglia carrabile, una vasca di prima pioggia, una vasca di raccolta e da condotte che convogliano l'acqua nel sistema fognario. L'acqua meteorica proveniente dai tetti viene intercettata dalle grondaie che la convogliano mediante dei pluviali all'interno del canale di raccolta. Le precipitazioni che ruscellano sulla superficie del laboratorio sono captate dai pozzetti con caditoie e le convoglieranno nel canale attraverso una tubazione. Dal

canale, l'acqua meteorica prosegue all'interno di una vasca di prima pioggia, collegata al canale mediante uno stramazzo triangolare. All'interno della vasca è posizionata una pompa sommersa che alimenterà l'impianto irriguo che irrorerà il verde pensile. La vasca di prima pioggia è collegata mediante un tubo troppo pieno ad una vasca di raccolta, una struttura interrata dov'è prevista la presenza di pompe trifase che alimenteranno un sistema di piogge artificiali che simulerà eventi meteorici e ne consentirà di analizzare gli effetti che questi hanno sul sistema di drenaggio. Nella parte superiore della vasca è collocato il verde pensile, un'area di bio-ritenzione che consentirà l'attenuazione dei picchi di portata che potranno verificarsi durante eventi estremi. Le precipitazioni che cadranno sul verde pensile verranno in parte captate dalla vegetazione e in parte si infiltreranno nel terreno dove un dreno le convoglierà all'interno di una vasca di raccolta.

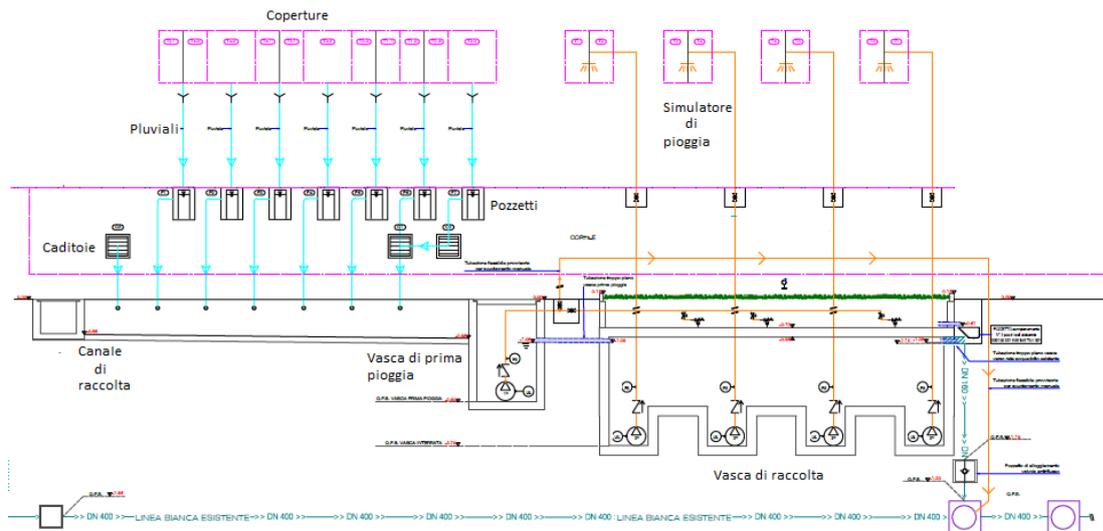


Figura 2.3: Funzionamento del Laboratorio green-court-lab

Per definire il funzionamento del sistema si sono utilizzati:

- dati spaziali (forniti da AREA EDILIZIA E LOGISTICA): sono definiti da elaborati grafici del Progetto esecutivo della "Ristrutturazione spazi per la realizzazione del Laboratorio cc-green-court-lab presso la sede centrale" che riportano planimetrie, sezioni (presenti in Allegato 1), piante e particolari costruttivi. Sugli elaborati sono presenti informazioni riguardanti la geometria del sito, le pendenze topografiche, le infrastrutture esistenti e di nuova realizzazione per la gestione delle acque meteoriche (ad esempio pozzetti, vasca di prima pioggia, condotte, vasca di raccolta.);
- dati di monitoraggio delle precipitazioni cumulate orarie e giornaliere che sono cadute a Torino.

3 ANALISI DEI DATI DI PRECIPITAZIONE

Lo studio dei dati di precipitazione è fondamentale per la definizione del funzionamento del Laboratorio green-court-lab. L'analisi dei dati di precipitazione ha consentito di definire i valori di input per le simulazioni.

I dati di monitoraggio che vengono utilizzati nell'analisi sono dati di precipitazione oraria e giornaliera registrati dal sistema automatico della rete di monitoraggio della Regione Piemonte (ARPA) e dalla stazione pluviometrica collocata nella sede centrale del Politecnico di Torino.

Tabella 3.1: Periodi dei dati a disposizione per le diverse stazioni pluviometriche collocate a Torino

Id stazione pluviometrica	Periodo dei dati a disposizione
Torino Buon Pastore	23/03/1989 - 30/08/2004
Torino Giardini Reali	07/08/2004 - 30/06/2019
Torino Italgas	10/11/1192 - 22/03/2001
Torino Reiss Romoli	01/01/2004 - 30/06/2019
Torino Vallere	18/05/2001 - 30/06/2019
Torino via della Consolata	20/12/2003 - 30/06/2019
Torino Politecnico	09/04/2015 - 05/06/2017

I dati registrati dalla Rete Regionale di Rilevamento Meteorologico di ARPA Piemonte sono stati scaricati accedendo al sito internet di Arpa Piemonte, nella sezione di "Accesso ai dati" (Arpa Piemonte).

Preliminarmente all'esecuzione delle analisi si sono geolocalizzate le stazioni pluviometriche, in modo tale da poter valutare, in funzione della distanza geometrica tra stazioni, la correlazione tra i dati registrati. La localizzazione delle stazioni pluviometriche per la città di Torino è stata eseguita su ortofoto mediante l'utilizzo del software qgis, che costituisce un sistema di informazione geografica libero e open source (QGIS) e ha consentito la georeferenziazione delle stazioni (le coordinate delle stazioni sono presenti come informazione nella banca dati meteorologica).

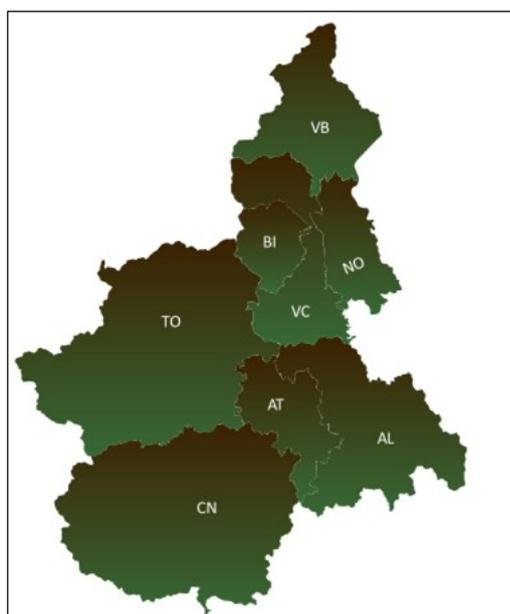


Figura 3.1: Delimitazione delle aree provinciali del Piemonte

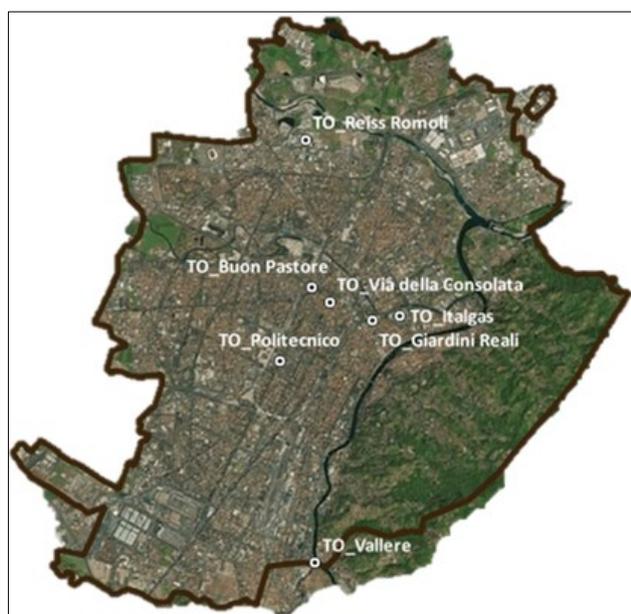


Figura 3.2: Localizzazione delle stazioni pluviometriche a Torino su ortofoto

3.1 CARATTERIZZAZIONE STATISTICA DEI DATI

La precipitazione al suolo è una grandezza di grande interesse per l'uomo sia quando vi è scarsità d'acqua che quando si hanno eventi meteorologici estremi. Le serie storiche di precipitazione sono caratterizzate dai valori di:

- Precipitazione cumulata annuale - Pa;
- Precipitazione cumulata mensile - Pm;
- Precipitazione cumulata giornaliera - Pg;
- Precipitazione cumulata oraria - Ph (Bracca G., 2013).

I dati di precipitazione giornaliera rilevati dalle stazioni automatiche ARPA sono definiti come valori cumulati tra le ore 9:00 dei due giorni consecutivi. Dalle serie temporali di precipitazione si sono definiti le distribuzioni mensili del numero di giorni piovosi.

L'elaborazione dei dati viene eseguita attraverso un'analisi delle caratteristiche di base e dei dati e un'analisi esplorativa (Bracca G., 2013).

3.1.1 Descrizione statistica

La descrizione statistica della serie di dati definisce informazioni riguardanti le caratteristiche intrinseche come la lunghezza, la continuità, la completezza e la frequenza (Bracca G., 2013).

Le principali caratteristiche quantitative e statistiche di base sono valutate per la definizione della descrizione statistica delle serie in esame, si tratta di:

- il numero massimo e numero totale di dati che rispettivamente indicano il numero di dati presenti nell'intervallo compreso tra la prima lettura e l'ultima e il numero di dati realmente presenti nella serie, non considerando i dati mancanti;
- i dati mancanti sono definiti dalla differenza tra il numero massimo di dati e il numero totale di dati (Bracca G., 2013);
- la continuità è nel seguente modo:

$$\text{continuità} = 1 - 2 \cdot \frac{\text{dati mancanti}}{\text{numero massimo di dati}} \% ; \text{(Bracca G., 2013)}$$

per le serie di dati che non presentano dati mancanti si ha un valore di continuità pari al 100%;

- la completezza è ottenuta come:

$$\text{completezza} = \frac{\text{numero totale di dati}}{\text{numero massimo di dati}} \% ; \text{(Bracca G., 2013)}$$

- media, è un indice di posizione e valutata nel seguente modo,

$$\text{media} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \text{(Bracca G., 2013)}$$

con x_i l'iesimo dato e N il numero di dati;

- varianza, è un indice di dispersione della distribuzione che valuta la variabilità del campione ed è definita come la media degli scarti quadratici rispetto alla media,

$$\text{varianza} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \text{media})^2 \text{(Bracca G., 2013)}$$

- deviazione standard è la radice quadrata della varianza,

$$\text{deviazione standard} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \text{media})^2} \text{(Bracca G., 2013)}$$

3.1.2 Analisi esplorativa

Per ultimare la caratterizzazione statistica dei dati si esegue l'analisi esplorativa, con cui vengono individuati l'andamento della serie temporale e l'istogramma di frequenza dei valori orari per valutare la distribuzione della precipitazione.

Si procede all'analisi dei dati orari, giornalieri, mensili e annui rilevati dalla stazione pluviometrica del Politecnico. Analoga procedura è stata definita per analizzare i dati registrati dalle stazioni pluviometriche stazioni Torino Giardini Reali e Torino via della Consolata, le quali fanno parte della rete

di monitoraggio ARPA. Inoltre, per tali stazioni i dati orari, non reperibili dal semplice accesso alla banca dati, sono stati richiesti in modalità automatica dal sito ARPA. Per le restanti stazioni pluviometriche ARPA si effettueranno analisi giornaliere, mensili e annue. Inoltre, la necessità di validare l'attendibilità dei dati rilevati dalla stazione del Politecnico ha richiesto il confronto dei dati orari con le stazioni pluviometriche più vicine.

3.2 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione pluviometrica Torino Politecnico

La stazione meteo del Politecnico di Torino è dotata di diversi sensori che ne consentono la registrazione di diverse grandezze fisiche, in particolare:

- sensore 2: lettura della temperatura;
- sensore 3: lettura dell'umidità relativa;
- sensore 4: lettura della pressione;
- sensore 8-9: lettura della direzione del vento;
- sensore 10: lettura delle radiazioni;
- sensore 11: lettura della pioggia al minuto;
- sensore 12: lettura della pioggia giornaliera;
- sensore 13: lettura della pioggia oraria.

I valori di precipitazione cumulata oraria sono stati rilevati dal sensore 13 della stazione pluviometrica del Politecnico. Il campione in esame presenta per un elevato numero di giorni, tra le ore 0:00 e 1:00, un valore di 0 mm e si è supposto che tale misura fosse un indice/parametro di controllo al funzionamento dello strumento.

Da un'attenta disamina sull'intero campione si è osservata l'assenza delle misure di controllo in alcuni giorni: 8/06/2015 (i valori di misura registrati sono alle 9:00 con un valore di 0 mm, alle 22:00 con valore di 0 mm e alle 23:00 con valore pari a 2.8 mm), 26/01/2016 (il valore di misura registrato alle 11:00 è di 0 mm), 14/07/2016 (i valori di misura registrati alle 9:00 e alle 15:00 sono di 0 mm), 15/07/2016 (i valori di misura registrati alle 9:00 e alle 14:00 sono di 0 mm) e per il giorno 16/07/2016 (il valore di misura registrato alle 16:00 è di 0 mm). Si evidenzia inoltre l'assenza di registrazione dei valori di misura nei giorni 23/12/2015 e 4/12/2015.

Vengono di seguito analizzate, alle diverse scale di aggregazione, le caratteristiche di base ed eseguita l'analisi esplorativa dei dati.

3.2.1 Scala oraria

A scala oraria le caratteristiche statistiche sono state valutate per il campione completo e per i singoli anni che lo caratterizzano, i valori ottenuti sono riportati nelle tabelle 3.1 e 3.2.

Tabella 3.1: Caratteristiche statistiche del campione

Descrizione statistica	
Caratteristica	Valore
Numero massimo di dati	18936
Numero totale di dati	18775
Numero di anni	2 anni, 1 mese e 27 gg
Istante primo dato	09/04/2015
Istante ultimo dato	05/06/2017
Valore massimo [mm]	33.20

Valore minimo [mm]	0.00
Dati mancanti	161
Completezza	98%
Continuità	99%

Approfondendo l'analisi sui singoli anni si evince che il 2016-2017 è caratterizzato da un numero inferiore di dati mancanti rispetto all'anno 2015-2016; si osserva inoltre come per due anni il valore minimo risulta essere lo stesso mentre il valore di precipitazione cumulata oraria massima presenta un valore massimo nell'anno 2015-2016.

Tabella 3.2: Caratteristiche statistiche dei due anni di campionamento

Caratteristica	Descrizione statistica	
	09/04/2015-08/04/2016	09/04/2016-08/04/2017
Numero massimo di dati	8784	8760
Numero totale di dati	8713	8670
Numero di anni	1 anno	1 anno
Istante primo dato	09/04/2015	09/04/2016
Istante ultimo dato	08/04/2016	08/04/2017
Valore massimo [mm]	33.2	33.4
Valore minimo [mm]	0	0
Dati mancanti	71	90
Completezza	98%	98%
Continuità	99%	99%

Sull'intero campione il valore medio di precipitazione cumulata oraria è di 0.10 mm, la varianza è di 0.69 e la somma di precipitazione oraria sui 2 anni di campionamento è di 1830.60 mm. Per l'anno definito dal 09/04/2015 al 08/04/2016 il valore totale di precipitazione oraria è di 887 mm e per l'anno 9/04/2016 – 08/04/2017 ha un valore inferiore rispetto al precedente.

Le statistiche di base del campione completo e per i singoli anni, dal 09/04/2015 – 08/04/2016 al 9/04/2016 – 08/04/2017 riassunti nelle tabelle 3.3 e 3.4.

Tabella 3.3: Valori delle statistiche di base del campione

Statistiche base	
Statistica	Valore
Media	0.10
Varianza	0.69
Deviazione standard	0.83
Somma totale sull'intero campione	1830.60

Tabella 3.4: Valori delle statistiche di base per i dati orari campionati dal 09/04/2015 – 08/04/2016 al 9/04/2016 – 08/04/2017

Statistica	Statistiche base di P_h	
	09/04/2015 - 08/04/2016	09/04/2016 - 08/04/2017
Media	0.10	0.09
Deviazione standard	0.93	0.75
Varianza	0.86	0.57
Somma annua [mm]	886.90	821.90

Sui dati orari viene eseguita un'analisi esplorativa del campione, dove viene rappresentato l'andamento della serie temporale oraria (Figura 3.3).

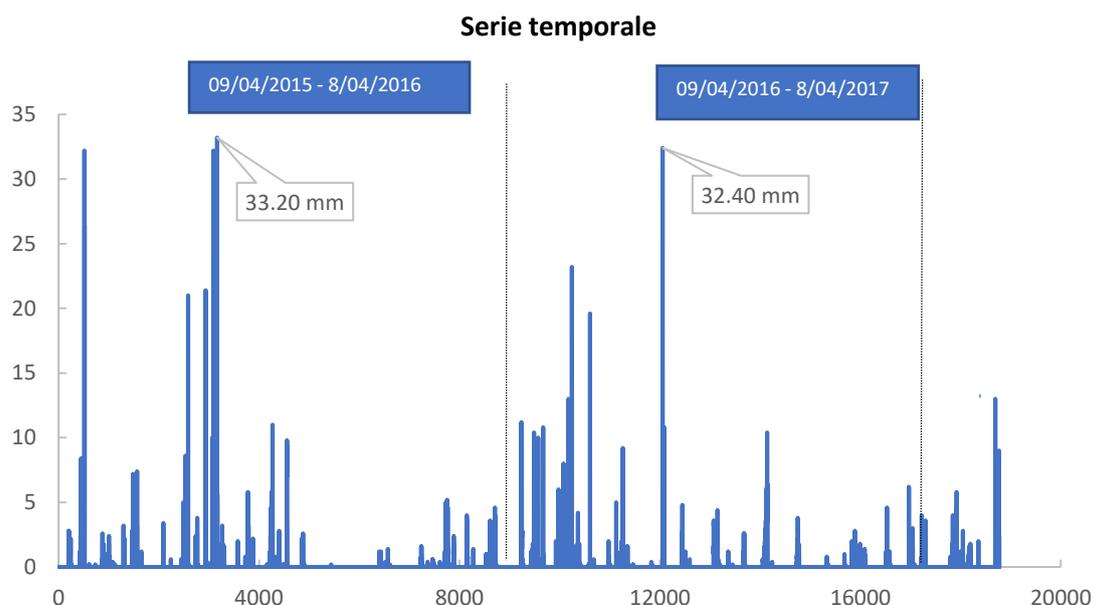


Figura 3.3: Andamento della serie oraria del campione in esame

Dall'andamento della serie temporale si osserva come il picco massimo di P_h per l'anno 09/04/2015 – 08/04/2016 è pari a 33.20 mm e si verifica nel giorno 18/08/2015 alle ore 19:00. Nella Figura 3.4 si riporta l'andamento della precipitazione cumulata oraria per l'anno 09/04/2015-08/04/2016, dal quale si nota come il picco di precipitazione si verifica alle ore 19:00 con un valore di 33.20 mm.

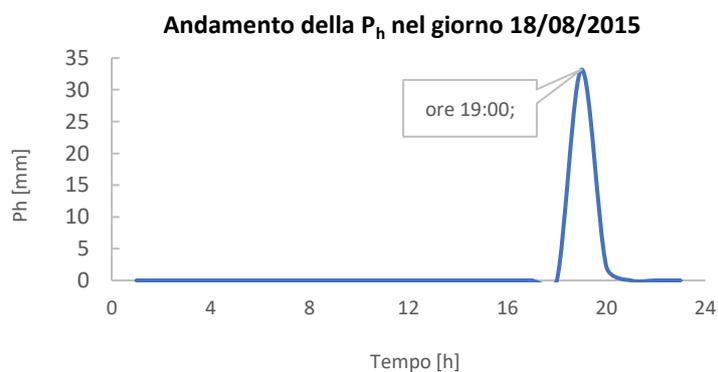


Figura 3.4: Andamento giornaliero delle precipitazioni orarie per il giorno 18/08/2015

Il valore massimo di precipitazione cumulata oraria per l'anno 09/04/2016-08/04/2017 si registra nel giorno 29/08/2016 (Figura 3.5) alle ore 21:00.

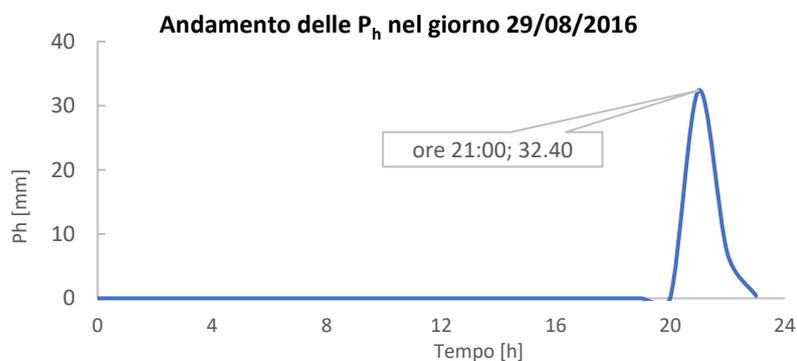


Figura 3.5: Andamento delle precipitazioni orarie per giorno 29/08/2016

Dall'analisi dell'andamento della serie temporale oraria si rileva un evento di pioggia continua nel giorno 20/12/2016.

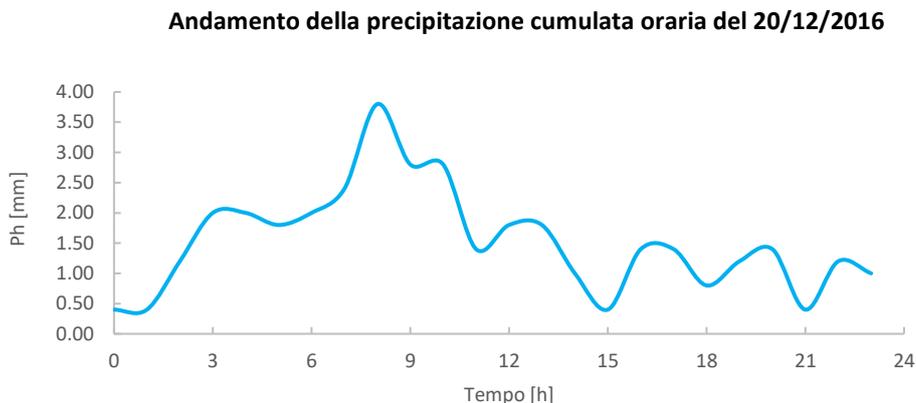


Figura 3.6 Andamento delle precipitazioni orarie per un evento di pioggia continua che si è avuta il 29/08/2016

La distribuzione della precipitazione cumulata oraria è stata valutata attraverso la definizione degli istogrammi di frequenza della precipitazione cumulata oraria e degli intertempi che individuano l'intervallo di tempo in ore tra un evento di pioggia e un altro.

Dalla Figura 3.7 viene messo in evidenza come i due istogrammi seguono un andamento esponenziale, in particolare dall'istogramma di pioggia oraria si nota che il 60% dei dati analizzati sono caratterizzati da un valore quasi pari a 1 mm, mentre dalla distribuzione degli intertempi di precipitazione si ha che il 10% delle precipitazioni si verifica in un intertempo di un'ora.

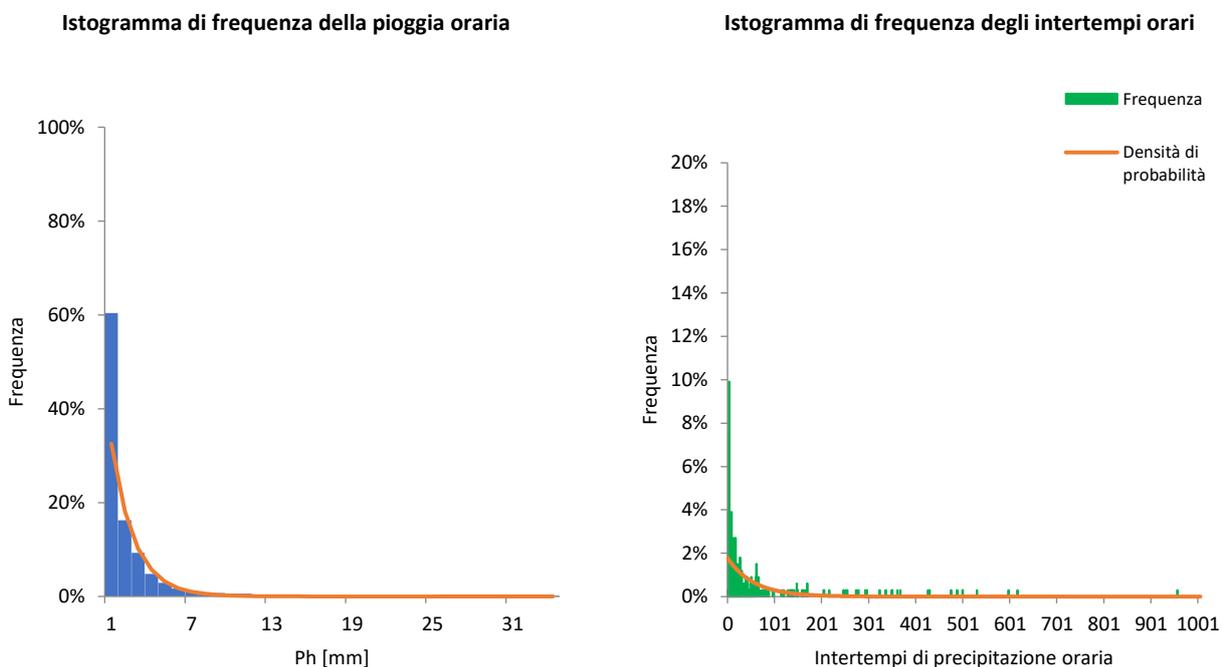


Figura 3.7: Istogrammi delle precipitazioni orarie e degli intertempi

3.2.2 Scala giornaliera

I valori giornalieri sono stati ottenuti dall'aggregazione delle precipitazioni cumulate orarie registrate dal sensore 13 della stazione pluviometrica del Politecnico.

Analogamente a quanto visto per l'analisi oraria, si procede alla valutazione delle caratteristiche statistiche giornaliere del campione completo e annuo. Nella tabella 3.5 si osservano dei valori di completezza del 99% per l'anno 09/04/2015-08/04/2016 e del 100 % per l'anno 09/04/2016-08/04/2017.

Tabella 3.5: Valori delle statistiche giornaliere

Caratteristica giornaliera	Descrizione statistica		
	Serie completa	09/04/2015-08/04/2016	09/04/2016-08/04/2017
Numero massimo di dati	789	366	365
Numero totale di dati	787	364	365
Numero di anni	2 anni, 1 mese e 29 gg	1 anno	1 anno
Istante primo dato	09/04/2015	09/04/2015	09/04/2016
Istante ultimo dato	05/06/2017	08/04/2016	08/04/2017
Valore massimo [mm]	92.6	64.4	92.6
Valore minimo [mm]	0	0	0
Dati mancanti	2	2	0
Completezza	99%	99%	100%
Continuità	100%	99%	100%

Dalla valutazione delle statistiche di base è stato messo in evidenza che il valore medio di precipitazione cumulata giornaliero è di 2.4 mm per l'anno 09/04/2015-08/04/2016 e 2.3 mm per l'anno 09/04/2016-08/04/2017. Le statistiche di base vengono definite per il campione completo e per i singoli anni e si riportano in forma tabellare (tabella 3.6).

Tabella 3.6: Valori delle statistiche di base

Statistica	Serie completa	Statistiche base	
		09/04/2015-08/04/2016	09/04/2016-08/04/2017
Media	1.56	2.4	2.3
Deviazione standard	6.80	8.8	7.9
Varianza	46.29	77.6	62.1
Somma dei valori	1830.6	886.9	821.9

Nell'analisi sono rappresentati la serie temporale alla scala giornaliera, dalla quale si osserva che per l'anno 09/04/2015-08/04/2016 il valore massimo delle precipitazioni cumulate giornaliere è di 64.4 mm e si registra nel mese di gennaio, per l'anno 09/04/2016-08/04/2017 l'andamento giornaliero presenta un picco massimo di 92.6 mm nel mese di luglio.

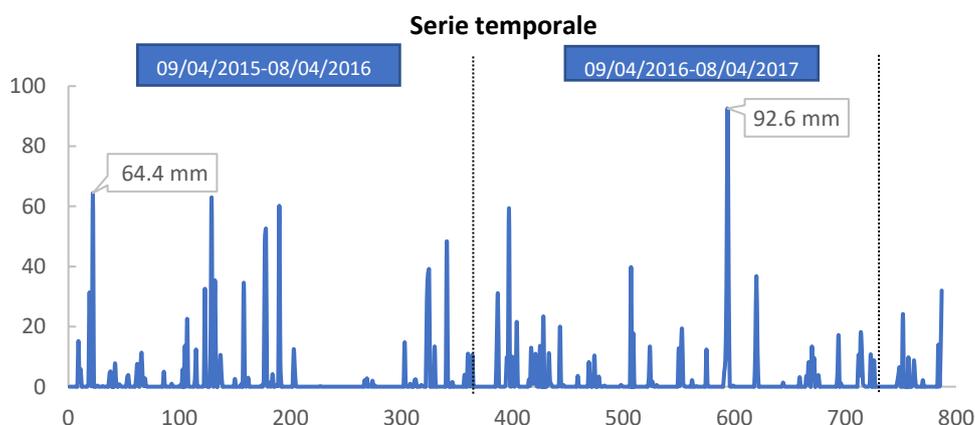


Figura 3.8 Andamento della serie temporale giornaliera

Dall'andamento giornaliero e dalla distribuzione mensile del numero di giorni piovosi (Figura 3.9), è possibile notare che per l'anno 2015 si registrano 15 giorni piovosi nel mese di ottobre e 17 giorni nel mese di giugno 2016.

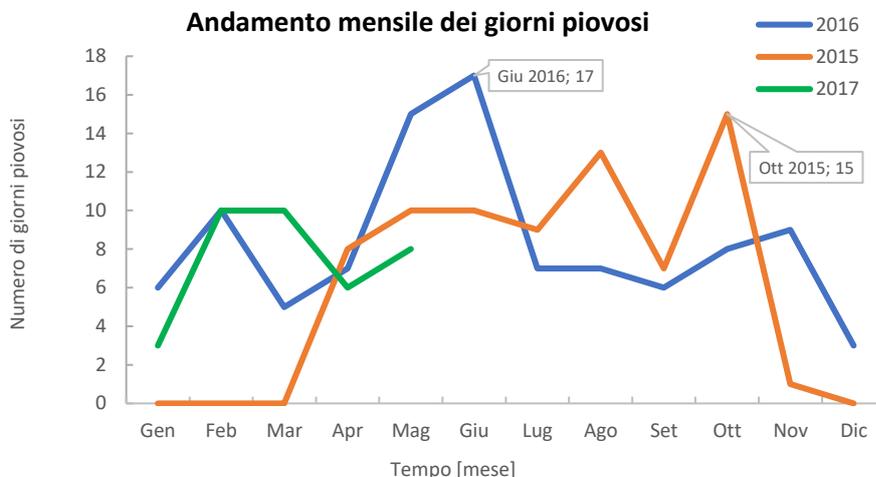


Figura 3.9: Andamento mensile del numero di giorni piovosi

3.2.3 Scala mensile

La serie a scala mensile è definita dall'aggregazione delle precipitazioni cumulate giornaliere e le caratteristiche statistiche sull'intero campione sono di seguito riassunte.

Tabella 3.7: Valori delle statistiche mensili per il campione completo

Caratteristica	Descrizione statistica	Valore
Numero massimo di dati		26
Numero totale di dati		26
Numero di anni		2 anni, 1 mese e 29 gg
Istante primo dato		09/04/2015
Istante ultimo dato		05/06/2017
Valore massimo [mm]		197.1
Valore minimo [mm]		0
Dati mancanti		0
Completezza		100%
Continuità		100%

L'andamento temporale della serie delle precipitazioni su scala mensile per gli anni 2015, 2016 e 2017 viene riassunto in forma tabellare (Tabella 3.8). Dalla figura 3.9 si osserva la distribuzione mensile della precipitazione per i 3 anni in esame, dove per l'anno 2015 si verificano 3 picchi registrati nei mesi di aprile, agosto e ottobre, nell'anno 2016 si verifica un andamento con 3 picchi nei mesi di febbraio, giugno e novembre. L'andamento mensile delle precipitazione per l'anno 2017 ha poca valenza a causa di un campione annuo non completo.

Tabella 3.8: Andamento mensile delle precipitazioni

Somma mensile [mm]			
Mese	2015	2016	2017
Gennaio	-	8.2	4.8
Febbraio	-	126.6	48.4
Marzo	-	66.6	68.2
Aprile	121.2	43.6	32.4
Maggio	24.4	157.8	51.8
Giugno	37.6	101.1	-
Luglio	51.4	29.4	-
Agosto	181.2	59.2	-
Settembre	44	19	-
Ottobre	197.1	48.6	-
Novembre	0.2	188.2	-
Dicembre	0	62	-

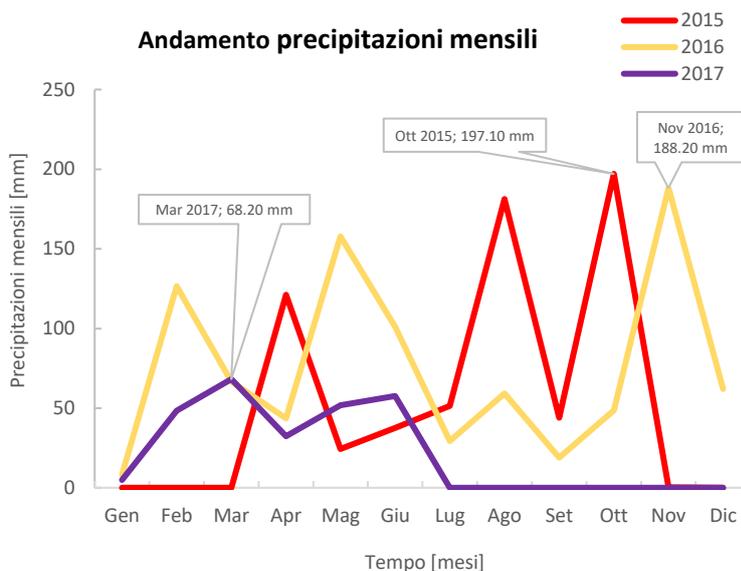


Figura 3.9: Andamento mensile delle precipitazioni

3.2.4 Scala annua

Dall'aggregazione dei valori mensili di precipitazione si definisce l'andamento annuo dei valori di precipitazione cumulata (Figura 3.10). Nell'anno 2016, per il quale è possibile definire un campione completo, si ha un valore di precipitazione cumulata annua pari a 910.30 mm, mentre per i due anni non completi, 2015 e 2017, si hanno rispettivamente dei valori di 657.10 mm e 263.10 mm.

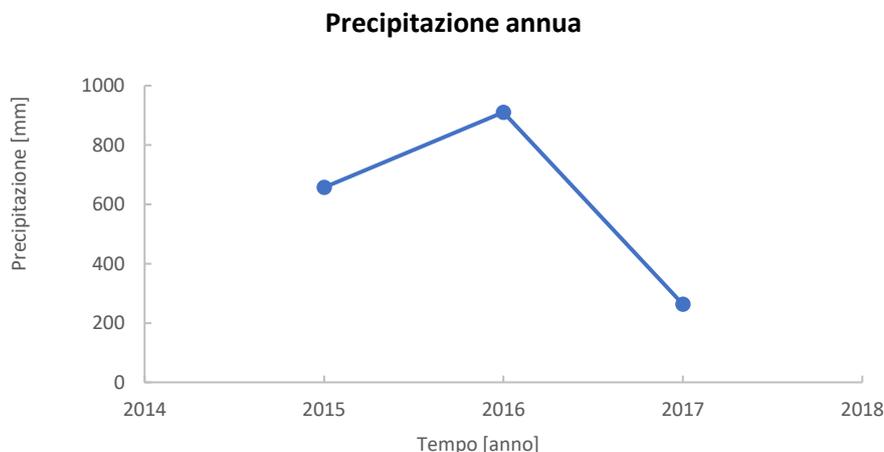


Figura 3.10: Rappresentazione grafica delle precipitazioni annue del campione in esame

3.3 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione Torino Giardini Reali

3.3.1 Scala oraria

La serie temporale delle precipitazioni cumulate orarie, che sono state richieste ad ARPA, riguarda un periodo temporale di 3 anni, 1 mese e 29 giorni, con istante d'inizio il 01/04/2018 e istante finale il 30/06/2018; l'andamento orario della serie viene di seguito riportato.

Serie temporale

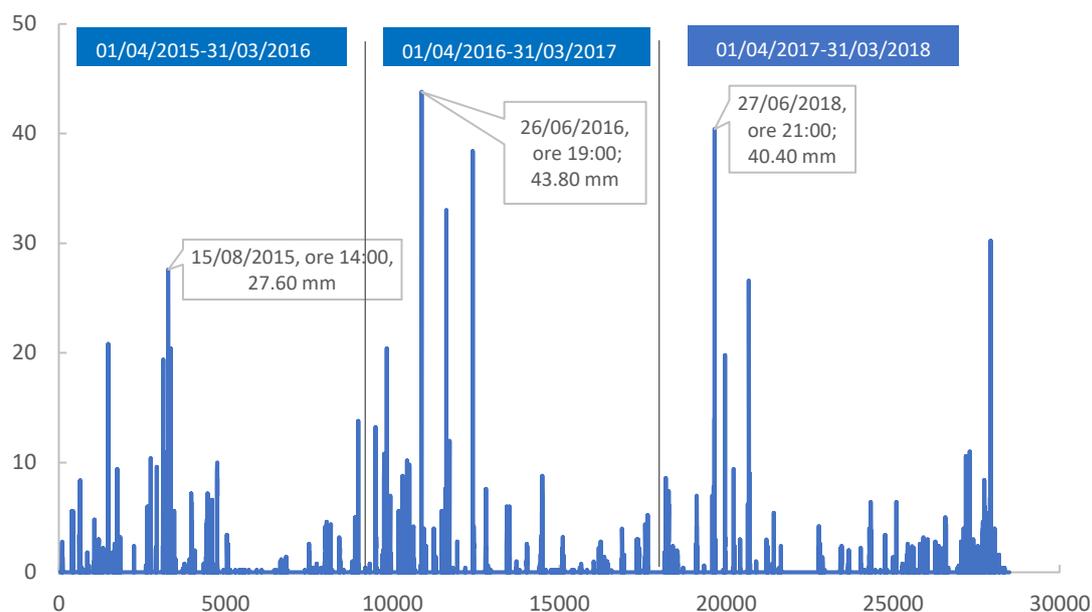


Figura 3.11: Andamento orario delle precipitazioni cumulate

Dalla definizione delle statistiche di base per la serie completa e i singoli anni, si evince un valore medio di precipitazione di 0.10 mm.

Tabella 3.9: Valori delle statistiche di base per il campione orario completo e per i singoli anni

Statistica	Serie completa	Statistiche base		
		1/04/2015-31/03/2016	1/04/2016-31/03/2017	1/04/2017-31/03/2018
Media	0.10	0.10	0.11	0.09
Deviazione standard	0.85	0.78	1.00	0.77
Varianza	0.72	0.61	0.99	0.73
Somma dei valori	2877	868.80	971.80	1036.40

Analogamente a quanto visto per la serie oraria rilevata dalla stazione pluviometrica Torino Politecnico, anche per la precipitazione cumulata oraria registrata dalla stazione Torino Giardini Reali si definiscono gli istogrammi di frequenza della precipitazione cumulata oraria e degli intertempi.

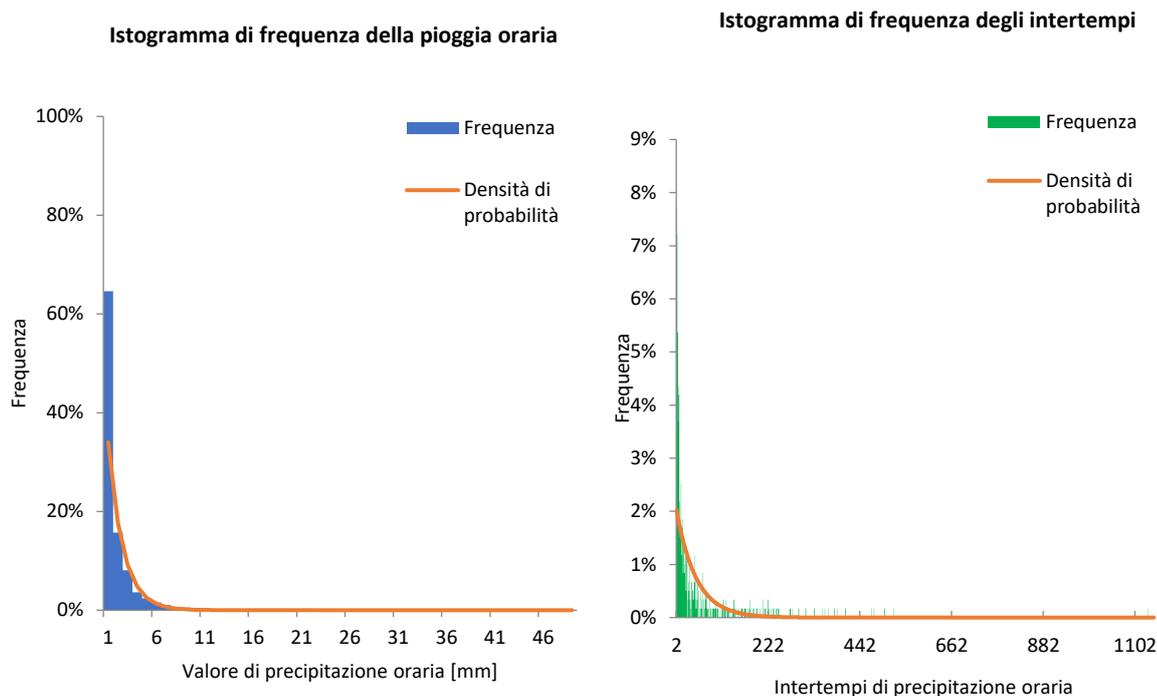


Figura 3.12: Rappresentazione dell'istogramma di frequenza delle piogge orarie e degli intertempi

Gli istogrammi presenti nella Figura 3.12 mostrano una distribuzione esponenziale del campione orario ed è possibile osservare che il 65% dei valori di precipitazione assume un valore circa pari a 1 mm e il 7% delle precipitazioni avviene in un intertempo di due ore.

3.3.2 Scala giornaliera

Le precipitazioni cumulate giornaliere per la stazione Torino Giardini Reali sono state acquisite dal sito Arpa; si tratta di una serie temporale di 14 anni, 10 mesi e 23 giorni, con un istante del primo dato rilevato il 07/08/2014 e l'ultimo il 30/06/2019; di seguito si riporta l'andamento della serie temporale, dalla quale si osserva come il valore massimo della precipitazione si verifica il 25/11/2016, con un valore di 95.40 mm.

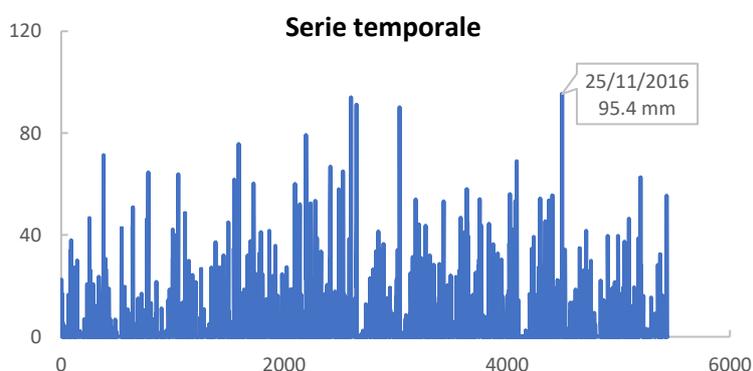


Figura 3.13: Rappresentazione dell'andamento giornaliero della serie temporale

Dalla definizione delle statistiche di base (Tabella 3.10) il valore massimo di precipitazione si è verificato per l'anno 2016 con un valore di precipitazione cumulata giornaliera pari a 2.92 mm; il valore medio maggiore è stato registrato nel 2010 e quello minore nel 2017, da tale osservazione è possibile definire l'anno umido e l'anno secco rispettivamente per gli anni 2010 e 2017.

Tabella 3.10: Definizione delle statistiche di base del campione giornaliero

Anno	Somma [mm]	Media	Valore max	Valore min
2005	591.4	1.62	71.4	0
2006	655.2	1.80	64.6	0
2007	703.6	1.93	63.8	0
2008	1166.2	3.19	75.6	0
2009	903.6	2.48	60.2	0
2010	1352.4	3.71	79.2	0
2011	1196.2	3.28	94	0
2012	880.6	2.44	90.2	0
2013	1096	3.00	53.8	0
2014	1308.6	3.60	58	0
2015	961.6	2.63	69	0
2016	1053.6	2.92	95.4	0
2017	544	1.54	41.6	0
2018	1079.8	3.03	62.6	0

La figura 3.14 riporta l'andamento del numero di giorni piovosi per i 14 anni di osservazione ed è possibile osservare che i due anni con il numero di giorni piovosi maggiori sono, il 2010 con 152 giorni e il 2016 con 161.



Figura 3.14: Andamento del numero di giorni piovosi



Figura 3.15: Andamento annuo del numero di giorni piovosi

3.3.3 Scala mensile

I valori di precipitazione mensile sono ottenuti dalla somma delle precipitazioni cumulate giornaliere; di seguito sono riportati i valori mensile per ogni anno.

Tabella 3.11: Valori di precipitazione mensile per i 14 anni di campionamento

Mese	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	2.2	85.6	14.0	69.0	64.0	58.6	21.2	24.6	21.0	79.0	21.2	8.6	6.6	96.4
2	1.2	55.8	1.2	15.8	42.8	80.6	38.2	5.0	25.4	124.8	131.6	94.6	47.4	79.8
3	43.6	17.8	32.6	10.0	82.0	72.8	225.0	46.4	132.6	103.4	136.0	92.6	59.4	80.2

4	120.6	24.4	20.8	135.4	254.4	45.8	45.8	147.8	176.6	53.6	89.0	38.2	47.4	86.6
5	43.0	103.8	112.6	174.4	34.0	161.8	13.0	162.2	181.4	142.6	34.8	180.2	62.2	172.4
6	17.0	29.8	215.0	114.0	52.0	237.0	281.2	100.8	53.4	87.6	75.8	139.8	115.2	82.6
7	52.0	34.0	20.2	63.6	113.2	18.4	152.8	78.8	102.2	242.4	31.0	87.2	51.0	136.6
8	106.6	37.6	91.8	67.6	35.6	217.4	22.2	31.2	96.8	75.2	184.8	74.6	51.4	25.6
9	109.2	187.8	81.8	93.4	71.8	77.4	149.4	53.8	33.4	45.2	51.0	36.0	26.2	51.8
10	69.6	26.8	54.0	8.8	35.2	76.2	15.4	33.2	65.8	37.8	204.0	63.6	0.0	125.6
11	10.0	9.4	59.2	165.2	66.8	205.6	230.4	191.4	112.2	212.4	1.4	181.4	38.0	134.2
12	16.4	42.4	0.4	249.0	51.8	100.8	1.6	5.4	95.2	104.6	1.0	56.8	39.2	8.0

Dalla Figura 3.16 si definisce un andamento del regime pluviometrico mensile crescente per i primi 6 mesi dell'anno, dove a giugno si raggiunge il valore di precipitazione mensile di 114.4 mm; segue una riduzione nel mese di luglio e un successivo andamento decrescente, in particolare nel mese di ottobre si registra un valore di precipitazione cumulata pari a 58.3 mm. Il picco nell'andamento del regime pluviometrico si verifica nel mese di novembre con un valore di 115.5 mm a cui segue una brusca riduzione.

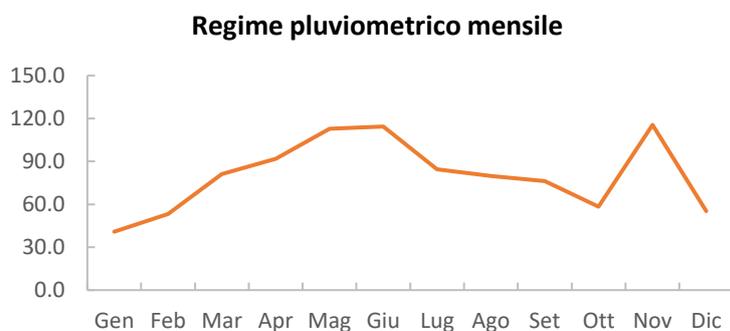


Figura 3.16: Andamento del regime pluviometrico mensile del campione

3.3.4 Scala annua

Dall'analisi annua si definisce un valore di precipitazione maggiore nell'anno 2010 e un valore minore per l'anno 2017. Nella figura 3.17 si riporta l'andamento dei valori annui di precipitazione per i 14 campioni. Dalla definizione delle statistiche di base si definisce un valore medio annuo sull'intero campione, pari a 963.8 mm.

Tabella 3.12: Statistiche di base per il campione osservato dalla stazione pluviometrica Torino Giardini Reali

Statistiche base	
Statistica	Valore
Media	963.8
Deviazione standard	262.0
Valore min	544.0
Valore max	1352.4

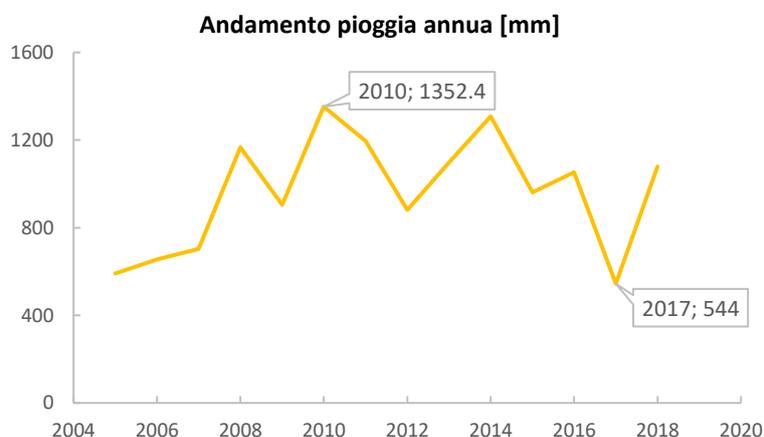


Figure 3.17: Andamento della pioggia annua

3.4 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione Torino via della consolata

3.4.1 Scala oraria

La serie delle precipitazioni cumulate orarie che viene analizzata è caratterizzata da un periodo temporale di 3 anni, 1 mese e 29 giorni, con istante d’inizio il 01/04/2018 e istante finale il 30/06/2018; l’andamento orario della serie viene di seguito riportato.

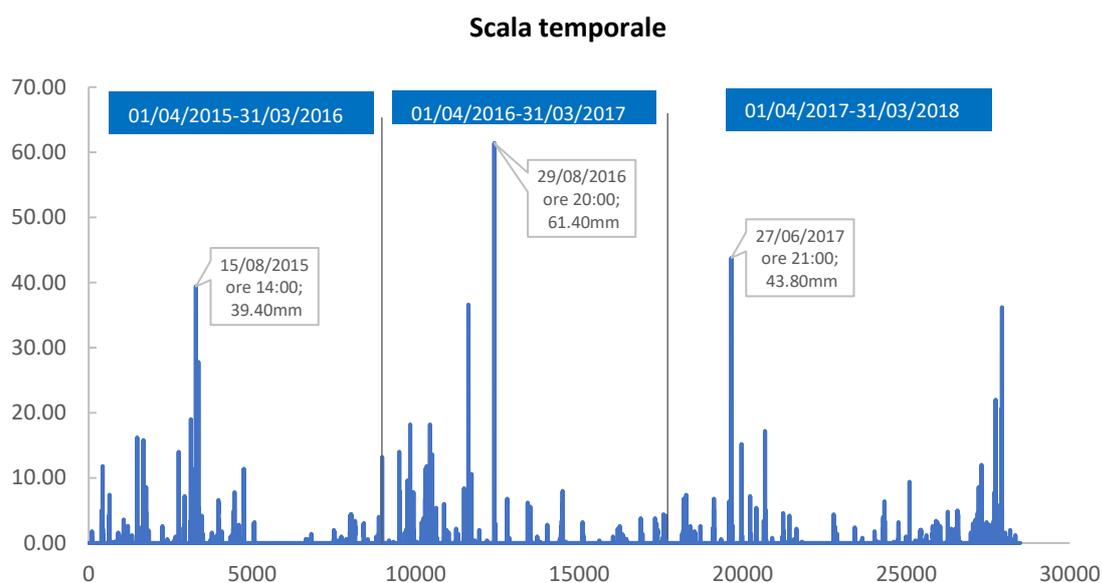


Figure 3.18: Andamento della serie temporale

Dall’andamento della serie temporale (Figura 3.18) e dalla definizione delle statistiche di base (Tabella 3.13) dei valori di precipitazione cumulata oraria è possibile individuare:

- nell’anno 1/04/2015-31/03/2016 un valore di precipitazione media oraria pari a 0.09 mm e un valore massimo di 39.4 mm che si registra il 15/08/2015 alle ore 14:00;
- nell’anno 1/04/2016-31/03/2017 si verifica un picco di precipitazione cumulata oraria con un valore di 61.4 mm nel mese 29/08/2016;
- nell’anno 1/04/2017-31/03/2018 dove viene registrato un valore medio di precipitazione oraria pari a 0.07 mm, che risulta essere il più dei tre anni.

Tabella 3.13: Definizione delle statistiche di base per i tre anni di valori orari

Statistica	Serie completa	1/04/2015-31/03/2016	1/04/2016-31/03/2017	1/04/2017-31/03/2018
Media	0.10	0.09	0.10	0.07
Deviazione standard	0.90	0.84	1.03	0.71
Varianza	0.81	0.71	1.07	0.50
Somma dei valori	2751.80	833.40	915.20	625.40

Dalla definizione dell’istogramma di frequenza di pioggia oraria e degli intertempi si evince una percentuale di frequenza campionaria di precipitazione oraria pari al 60% e per l’8% dei campioni si ha che la precipitazione si verifica con un intertempo di 2 ore.

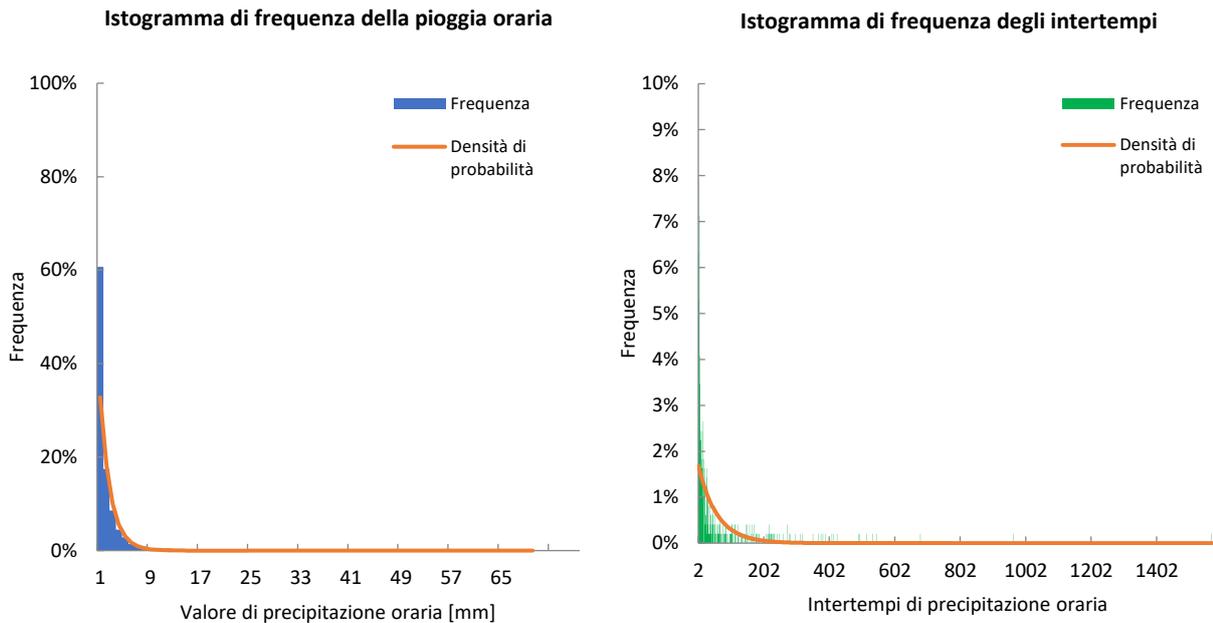


Figure 3.19: Rappresentazione degli istogrammi di frequenza oraria delle piogge e degli intertempi

3.4.2 Scala giornaliera

La serie di precipitazioni cumulate giornaliere, reperite dal sito Arpa, è caratterizzata da una durata temporale di 15 anni, 5 mesi e 10 giorni, con un istante del primo dato rilevato il 20/12/2003 e l'ultimo il 30/06/2019; di seguito si riporta l'andamento della serie temporale.

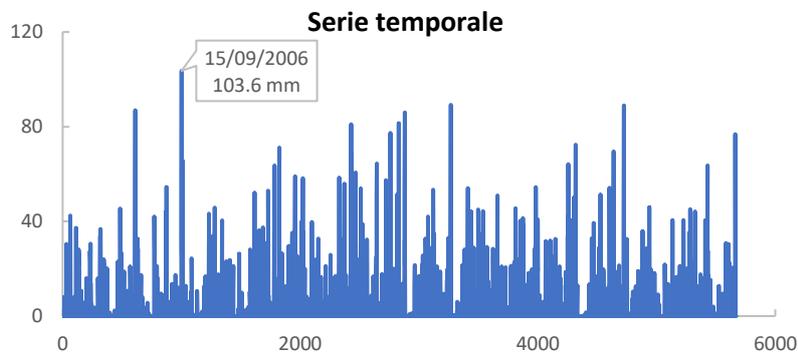


Figura 3.20: Serie temporale dei valori giornalieri

Dall'analisi delle statistiche di base si definisce un valore di precipitazione medio massimo nell'anno 2010 e un valore minimo nell'anno 2017. Il valore di precipitazione cumulata giornaliera massima si registra nel 2006 con un valore di 103.6 mm.

Tabella 3.14: Valori delle grandezze statistiche di base

Anno	Somma [mm]	Media	Valore max	Valore min
2004	735	2.01	42.4	0
2005	582	1.59	87	0
2006	704.6	1.94	103.6	0
2007	636.2	1.74	45.8	0
2008	1202.6	3.29	71.2	0
2009	834.6	2.29	59	0
2010	1327	3.64	81	0
2011	1171.4	3.21	86	0
2012	883	2.41	89.2	0
2013	1043.6	2.86	54	0

2014	1164.8	3.19	54.4	0
2015	902.6	2.47	72.4	0
2016	989.8	2.71	89	0
2017	492.2	1.35	46	0
2018	1097.6	3.01	63.6	0
2018	1097.6	3.01	63.6	0

Dall'andamento de giorni piovosi si evince che l'anno 2018 è caratterizzato dal numero massimo di giorni piovosi, 141, e dalla distribuzione mensile dei giorni piovosi si conferma che il periodo più umido è il compreso nei mesi di aprile e giugno, mentre nel mese di dicembre si registrano solo 5 giorni di pioggia.



Figura 3.21: Andamento del numero di giorni piovosi



Figura 3.22: Andamento dei giorni piovosi per mese

3.4.3 Scala mensile

I valori di precipitazione mensile sono definiti dall'aggregazione dei valori giornalieri (Tabella 3.15).

Tabella 3.15: Valori mensili delle precipitazioni cumulate

Mese	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Gen	45.2	1.4	73.0	13.2	55.80	38.60	38.60	10.80	34.60	11.80	68.60	13.40	4.40	2.60	88.80
Feb	84.6	2.8	46.0	0.6	11.20	31.20	57.20	29.20	8.40	11.80	92.40	102.60	81.00	33.40	62.20
Mar	12.4	39.2	15.2	28.8	7.60	76.60	50.80	205.40	38.40	112.20	85.60	122.20	83.40	58.40	76.60
Apr	77.2	115.8	23.6	19.8	131.20	245.20	39.60	44.40	136.00	172.80	48.80	87.00	35.00	42.00	86.60
Mag	141.8	40.6	111.4	115.2	196.20	34.20	176.20	14.60	166.00	182.20	129.60	29.80	185.60	66.60	191.60
Giu	9.2	18.8	27.0	182.8	141.60	61.80	261.40	272.80	88.80	60.20	76.80	73.40	118.00	127.00	99.60
Lug	35.2	47.0	36.4	23.8	62.00	115.20	24.20	170.80	101.20	107.00	202.80	29.80	79.00	40.80	131.40
Ago	115.2	108.8	42.4	78.2	110.80	29.40	230.80	29.20	38.80	100.40	75.60	195.60	85.60	34.60	37.80
Set	4.6	124.0	253.4	68.4	98.40	67.20	84.20	150.60	52.40	34.20	42.40	51.40	34.40	25.20	63.00
Ott	68.2	67.0	24.2	52.0	7.40	34.00	78.60	13.80	29.00	63.40	36.80	197.40	61.40	0.00	127.60
Nov	89.8	7.8	7.6	53.4	162.40	61.60	203.20	229.00	187.40	105.60	207.60	0.00	171.80	37.60	127.20
Dic	51.6	8.8	44.4	0.0	218.00	39.60	82.20	0.80	2.00	82.00	97.80	0.00	50.20	24.00	5.20

L'andamento del regime pluviometrico medio mensile della serie delle precipitazioni mette in evidenza il mese maggiormente piovoso, che risulta essere il mese di maggio con un valore di precipitazione pari a 118,8 mm.

Regime pluviometrico mensile

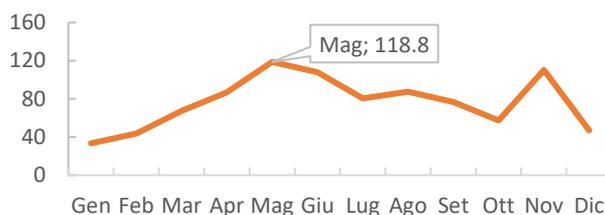


Figura 3.23: Andamento del regime pluviometrico mensile

3.4.4 Scala annua

Nell'analisi annua delle precipitazioni si valuta l'andamento annuo della pioggia che viene rappresentato dal grafico sottostante, dove si nota che nell'anno 2010 si ha il valore massimo di precipitazione, mentre il minimo valore è registrato nel 2017.

Tabella 3.15: Statistiche di base per i valori annui registrati nella stazione Torino via della Consolata

Statistiche base	
Statistica	Valore
Media	917.8
Deviazione standard	251.8
Valore min	492.2
Valore max	1327

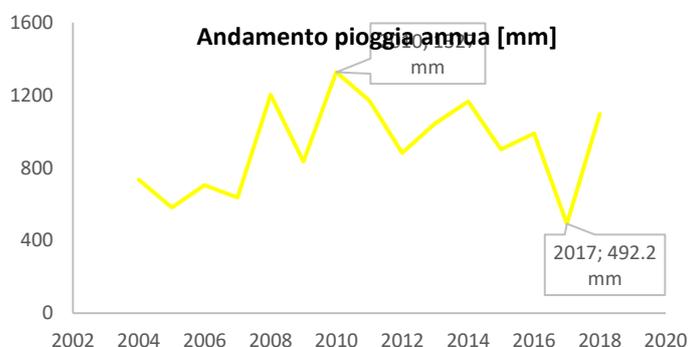


Figura 3.24: Andamento della pioggia annua

3.5 Analisi dei dati di registrati dalla Stazione Torino Buon Pastore

3.5.1 Scala giornaliera

Per le precipitazioni cumulate giornaliere, la stazione Torino Buon Pastore ha rilevato i dati dal 23/03/1989 al 03/08/2004; di seguito si riporta l'andamento della serie temporale che è caratterizzata da una durata di 15 anni, 4 mesi e 16 giorni.

Serie temporale

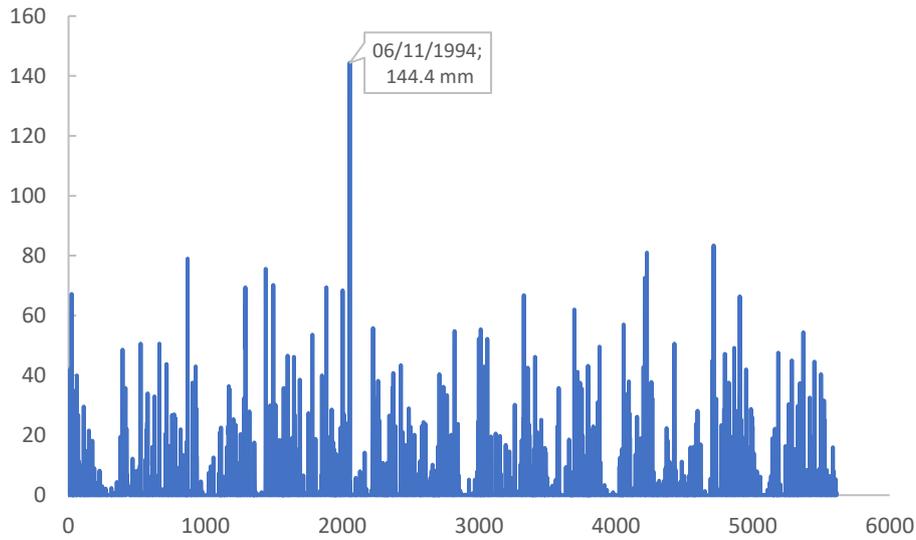


Figura 3.25: Andamento della serie temporale

La definizione delle statistiche di base ha consentito di individuare l'anno in cui si è verificato il valore massimo di precipitazione giornaliera, che è il 1994 dove è stato registrato un valore una precipitazione giornaliera di 144.4 mm.

Tabella 3.3-16: Valori delle statistiche di base per i dati di precipitazione giornaliera

Anno	Somma [mm]	Media	Valore max	Valore min
1990	622	1.71	50.6	0
1991	809.8	2.24	79	0
1992	1021.2	2.79	69.4	0
1993	1019	2.79	75.6	0
1994	1190.8	3.26	144.4	0
1995	853	2.34	55.8	0
1996	999.6	2.78	54.8	0
1997	582	1.59	55.4	0
1998	726	1.99	66.8	0
1999	927.8	2.54	62	0
2000	1021	2.79	81	0
2001	474	1.30	50.6	0
2002	1361	3.73	83.4	0
2003	756.2	2.07	54.4	0

Numero di giorni piovosi

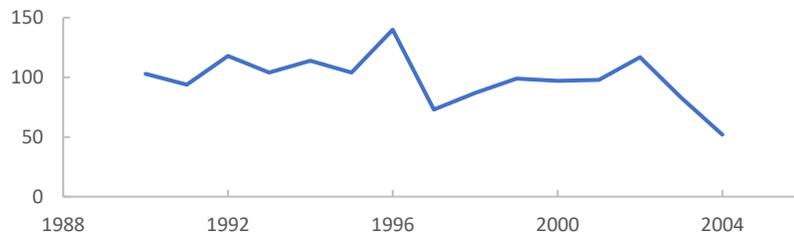


Figura 3.26: Rappresentazione del numero di giorni piovosi

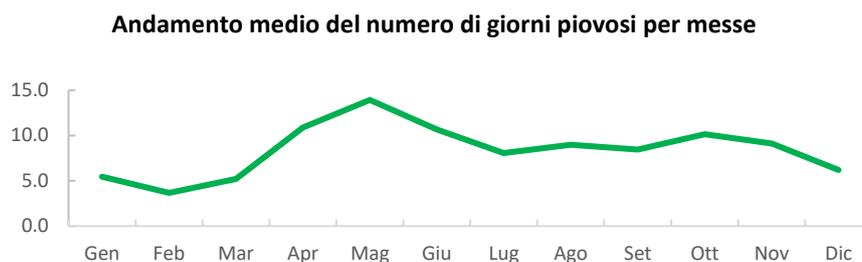


Figura 3.27: Rappresentazione mensile del numero di giorni piovosi

Nella Figura 3.26 viene definito il numero di giorni piovosi per ciascun anno che la stazione pluviometrica ha registrato, si evince che l'anno con il numero maggiore di giorni piovosi è il 1996 con 140 giorni e quello con il numero di giorni piovosi minore è il 2004. Dall'andamento mensile del numero di giorni piovosi medio rispetto ai 15 anni di dati, si osserva che il mese di febbraio è quello in cui ha piovuto meno e il picco massimo di giorni piovosi si verifica a maggio con 15 giorni.

3.5.2 Scala mensile

L'analisi mensile delle precipitazioni viene condotta definendo il valore mensile (Tabella 3.17) per ciascun anno dei dati osservati e si valuta poi l'andamento del regime mensile (Figura 3.28).

Tabella 3.17: Valori di precipitazione mensile

Mese	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Gen	-	2.4	70.0	26.2	1.4	81.20	12.00	145.60	63.0	24.20	98.60	0.00	14.0	6.2	17.8	48.0
Feb	-	2.4	2.6	12.6	6.2	92.60	24.60	56.20	0.2	41.00	0.00	1.20	15.8	186.4	0.2	89.8
Mar	-	8.4	189.2	18.8	149.	23.60	2.20	18.40	5.2	1.60	50.40	17.20	94.6	42.4	1.8	13.4
Apr	319.8	125.4	69.2	91.6	189.4	102.20	168.60	89.00	0.6	111.20	23.40	119.80	8.2	61.2	52.6	99.2
Mag	109.6	135.4	96.8	58.0	90.00	229.40	120.20	93.40	22.6	209.00	240.80	154.00	135.8	233.6	65.8	141.0
Giu	42.2	29.4	43.4	291.2	63.80	64.40	132.00	32.80	210.0	102.20	114.80	95.40	24.6	98.6	86.2	8.4
Lug	58.2	28.2	33.2	99.4	57.00	73.40	26.00	35.00	61.0	67.60	66.40	34.20	20.8	112.6	23.2	38.0
Ago	62.2	85.8	101.2	47.6	104.6	14.80	75.00	134.20	86.0	34.40	105.80	71.60	42.8	227.4	83.8	0.8
Set	39.0	2.0	81.8	92.4	155.0	208.80	138.40	66.60	21.8	52.40	51.40	140.40	29.2	97.4	54.2	-
Ott	5.0	144.2	113.8	222.6	112.4	48.20	27.20	113.80	23.0	68.60	81.60	233.00	58.8	82.6	70.4	-
Nov	19.6	18.0	8.6	29.6	82.80	243.00	86.20	86.40	43.0	6.00	86.20	133.80	27.4	161.4	156.2	-
Dic	7.6	40.4	0.0	31.2	7.40	9.20	40.60	128.20	45.6	7.80	8.40	20.40	2.0	51.2	144.0	-

Regime pluviometrico mensile



Figura 3.28: Rappresentazione dell'andamento del regime pluviometrico mensile

L'andamento del regime pluviometrico mensile, definito per i dati della stazione pluviometrica Torino Buon Pastore, mette in evidenza una distribuzione dei dati di pioggia mensile crescente fino a maggio, per poi decrescere a luglio e ad avere un quantitativo di pioggia caduto più alto da agosto a novembre.

3.5.3 Scala annua

Dall'andamento annuo delle precipitazioni si osserva come nell'anno 2002 si sia registrato il valore massimo annuo e con un valore di 474 mm si individua il 2001 come l'anno più secco.

Tabella 3.18: Statistiche di base per i valori annui

Statistiche base	
Statistica	Valore
Media	883.10
Deviazione standard	243.13
Valore min	474.00
Valore max	1361.00

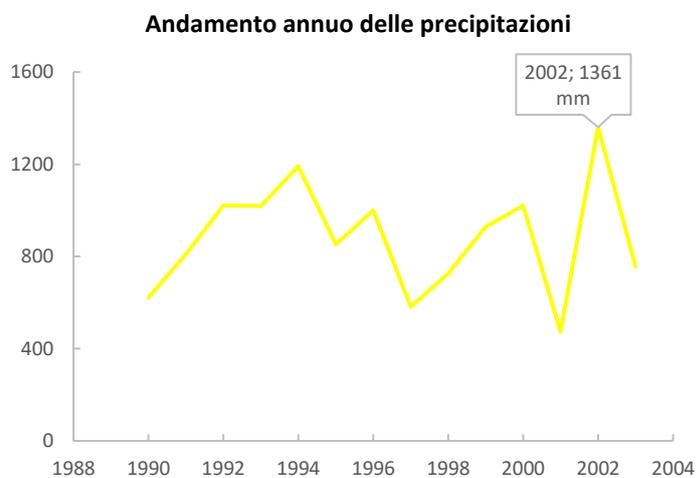


Figura 3.29: Rappresentazione dell'andamento annuo di precipitazione

3.6 Analisi dei dati di precipitazione della Stazione Torino Italgas

3.6.1 3.6.1 Scala giornaliera

Per le precipitazioni cumulate giornaliere, la stazione Torino Italgas ha rilevato i dati dal 12/11/1992 al 22/03/2001; di seguito si riporta l'andamento della serie temporale che è caratterizzata da una durata di 8 anni, 4 mesi e 10 giorni. Dalla serie temporale si definisce un valore di picco massimo nel giorno 6/11/2004 dove vengono registrati 151 mm di precipitazione cumulata giornaliera.

Serie temporale

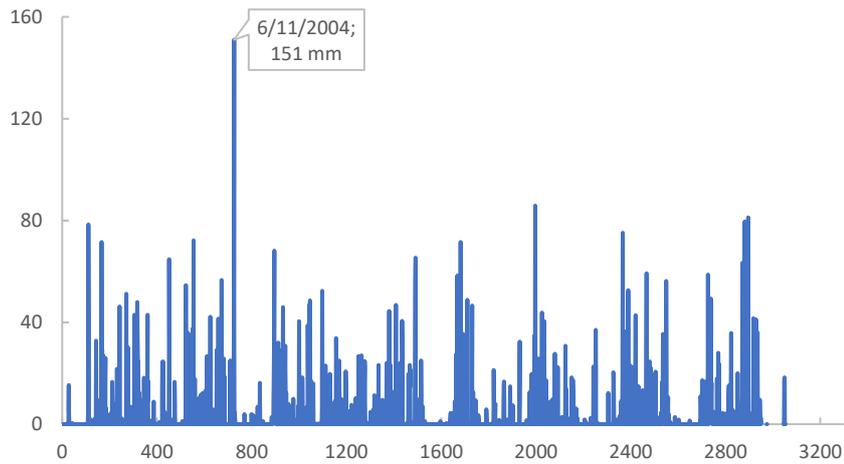


Figura 3.30: Rappresentazione della serie temporale di dati

Vengono di seguito riassunti i valori medi giornaliere delle precipitazioni nei diversi anni di rilevamento, i valori massimi e minimi giornaliere e le somme annue delle piogge.

Tabella 3.19: Definizione dei valori giornalieri max e min e la somma dei dati per ciascun anno

Anno	Somma[mm]	Media	Valore max	Valore min
1993	1083.20	2.97	78.40	0.00
1994	1314.00	3.60	151.00	0.00
1995	965.00	2.64	68.20	0.00
1996	1160.00	3.17	65.40	0.00
1997	571.20	1.56	71.60	0.00
1998	743.00	2.04	85.80	0.00
1999	1014.00	2.78	75.20	0.00
2000	1080.80	3.13	81.20	0.00

Dall'andamento dei giorni piovosi si nota che per l'anno 1996 si ha un numero di giorni piovosi pari a 137 e dalla rappresentazione dell'andamento medio del numero di giorni piovosi per mese si evince che il mese di maggio è caratterizzato dal numero massimo di giorni piovosi, mentre il mese con il numero di giorni piovosi più basso è febbraio.



Figura 3.31: Andamento del numero di giorni piovosi

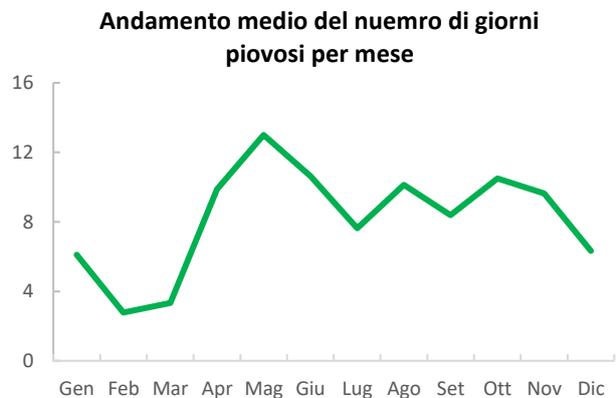


Figura 3.32: Andamento dei giorni piovosi per mese

3.6.2 Scala mensile

Nell'analisi mensile si valuta il valore delle precipitazioni per ciascun anno della serie e la successiva rappresentazione grafica dell'andamento del regime pluviometrico mensile.

Tabella 3.20: Valori mensili delle precipitazioni cumulate per gli anni di funzionamento del pluviometro

Mese	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Gen	0.0	86.2	9.6	158.60	63.60	25.00	102.60	0.00	0.00
Feb	4.0	107.8	25.4	57.20	0.00	44.00	0.00	1.40	0.00
Mar	153.0	22.2	1.4	20.80	1.20	1.60	53.40	21.20	36.20
Apr	196.8	123.6	199.6	97.40	0.40	106.20	26.60	136.60	-
Mag	107.0	237.4	118.0	98.00	23.20	216.60	265.40	160.00	-
Giu	56.0	53.6	150.0	57.20	227.80	126.60	126.20	77.60	-
Lug	61.0	117.6	29.4	56.80	70.60	51.60	66.40	46.40	-
Ago	99.2	36.0	85.0	152.00	79.80	28.40	141.60	73.60	-
Set	179.2	218.0	181.8	91.00	6.20	55.00	48.60	168.00	-
Ott	122.8	50.4	22.0	130.80	8.40	80.40	86.80	233.40	-
Nov	93.4	255.6	100.0	94.20	44.60	4.00	89.60	147.40	-
Dic	10.8	5.6	42.8	146.00	45.40	3.60	6.80	15.20	-

L'andamento del regime pluviometrico mostra un valore massimo di precipitazione mensile nel mese di maggio con un valore di 153.2 mm e un valore minimo nel mese di febbraio dove si registrano 26.6 mm di pioggia.

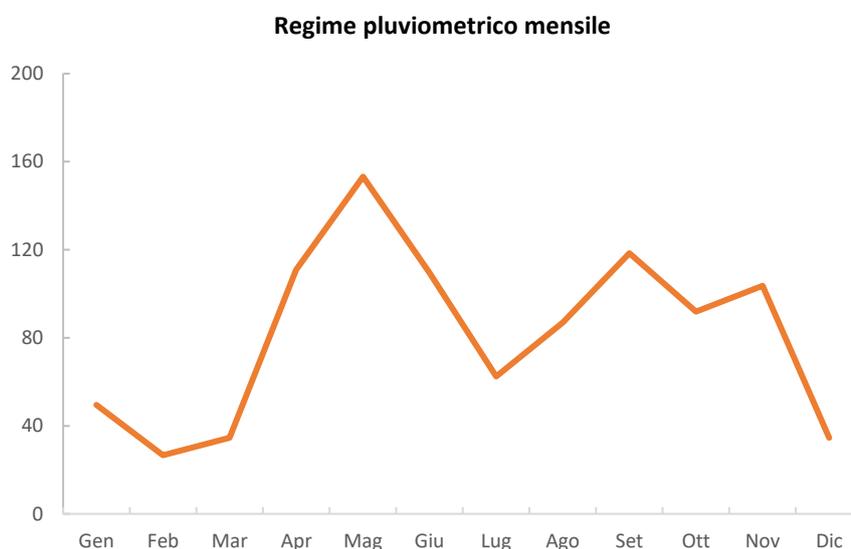


Figura 3.33: Andamento del regime pluviometrico mensile

3.6.3 Scala annua

L'andamento annuo delle precipitazioni riportato nel grafico (Figura 3.34) individua il 1994 come l'anno in cui si registra il maggior quantitativo di afflusso meteorico, mentre nel 1997 si registrano solo 571.20 mm d'acqua.

Tabella 3.21: definizione delle statistiche di base annue

Statistiche base	
Statistica	Valore
Media	991.40
Deviazione standard	235.55
Valore min	571.20
Valore max	1314.00

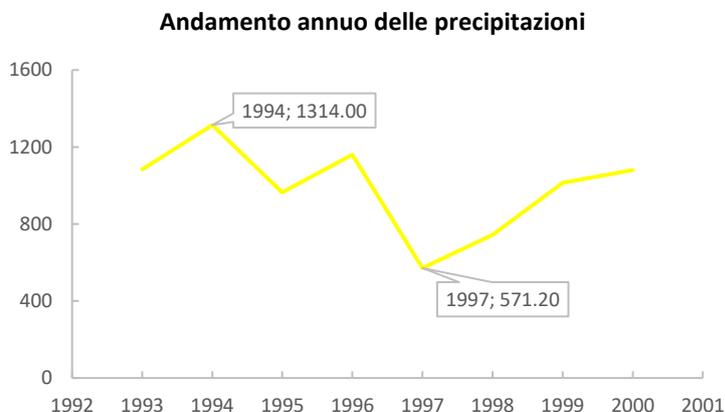


Figura 3.34: Rappresentazione dell'andamento annuo delle precipitazioni

3.7 Analisi dei dati di precipitazione registrati dalla Stazione Torino Reiss Romoli

3.7.1 Scala giornaliera

Per le precipitazioni cumulate giornaliere, la stazione Torino Italgas ha rilevato i dati dal 1/1/2004 al 30/06/2019; di seguito si riporta l'andamento della serie temporale che è caratterizzata da una durata di 14 anni, 5 mesi e 29 giorni.

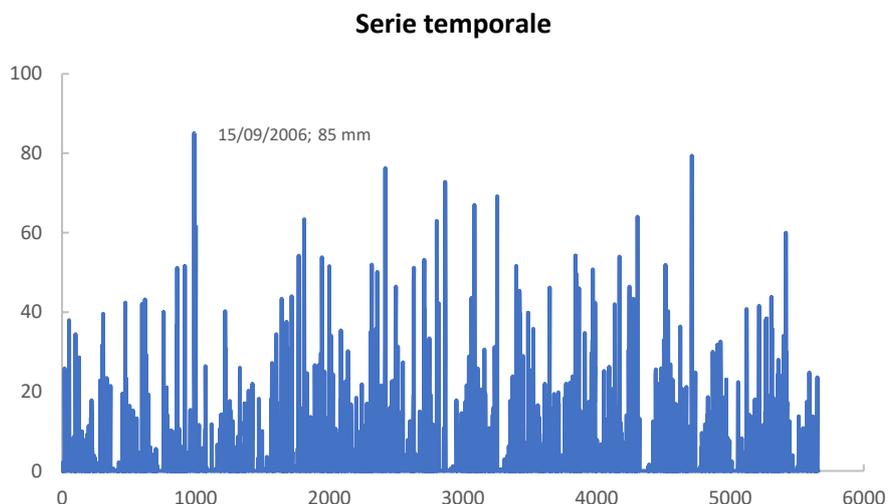


Figura 3.35: Rappresentazione della serie temporale

Dall'analisi di caratterizzazione statistica sulla serie di dati, si definisce un valore massimo di precipitazione cumulata giornaliera registrato nel 2010 e pari a 79.40 mm e il valore massimo più basso registrato nei 14 anni di servizio del pluviometro si verifica nel 2017 con un valore di 32.70 mm

Tabella 3.22: Definizione dei valori giornalieri max e min e la somma dei dati per ciascun anno

Anno	Somma[mm]	Media	Valore max	Valore min
2004	685.80	1.87	39.60	0.00

2005	536.00	1.49	43.20	0.00
2006	687.80	1.92	85.00	0.00
2007	515.00	1.41	40.20	0.00
2008	1035.00	2.88	63.40	0.00
2009	876.40	2.40	53.80	0.00
2010	1125.20	3.08	76.20	0.00
2011	964.60	2.64	72.80	0.00
2012	800.80	2.19	69.20	0.00
2013	944.80	2.59	51.60	0.00
2014	1197.80	3.28	54.20	0.00
2015	945.40	2.59	64.00	0.00
2016	877.80	2.40	79.40	0.00
2017	514.40	1.41	32.60	0.00
2018	1109.60	3.04	60.00	0.00

Dall'andamento dei giorni piovosi si definisce l'anno 2014 come l'anno in cui si verificano il numero maggiore di giorni piovosi (133 giorni) e dalla valutazione della distribuzione del numero medio di giorni piovosi per mese si ha che il mese in cui piove per più giorni è maggio.

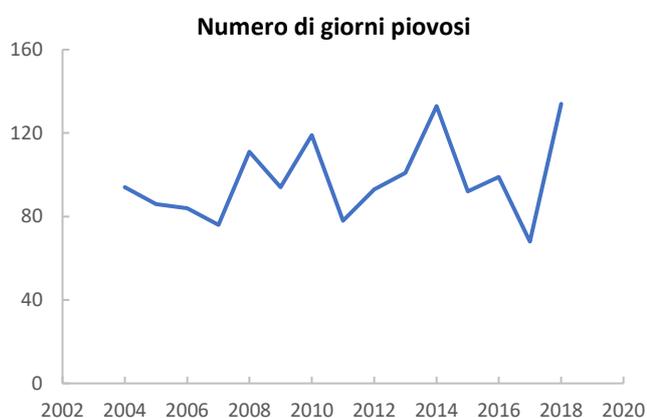


Figura 3.36: Andamento del numero di giorni piovosi

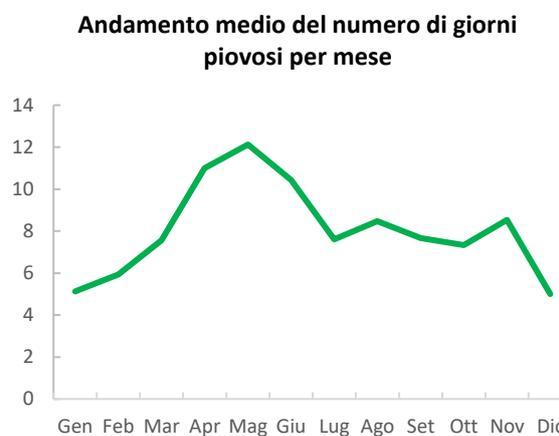


Figura 3.37: Andamento dei giorni piovosi per mese

3.7.2 Scala mensile

Nell'analisi mensile si valuta il valore delle precipitazioni per ciascun anno della serie e la successiva rappresentazione grafica dell'andamento del regime pluviometrico mensile.

Tabella 3.23: Valori mensili delle precipitazioni cumulate per gli anni di funzionamento del pluviometro

Mese	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Gen	29.8	0.6	68.8	14.60	44.60	36.20	33.20	9.60	31.40	7.00	65.00	14.20	4.40	1.60	87.20
Feb	69.8	2.0	43.4	0.40	11.40	33.00	53.60	25.60	3.00	12.80	84.80	84.60	65.80	29.00	51.80
Mar	17.8	38.0	16.2	30.40	6.40	80.00	45.80	173.40	24.40	93.20	83.40	95.80	58.60	62.80	61.20
Apr	89.4	111.6	31.8	17.40	116.80	235.00	57.80	30.00	107.40	181.80	47.00	91.80	45.60	50.80	89.40
Mag	118.4	32.8	108.6	111.20	154.80	42.60	170.60	13.80	159.60	188.00	105.00	51.60	146.80	59.00	158.60
Giu	11.6	22.4	16.4	112.60	97.80	105.00	185.60	229.80	96.80	56.00	75.00	108.00	133.20	139.00	110.40
Lug	39.6	30.0	58.0	22.00	51.40	90.60	43.00	123.20	63.60	82.80	232.60	21.40	70.00	49.80	169.60
Ago	89.8	60.4	49.2	58.20	118.60	37.80	158.00	17.80	64.00	65.60	99.80	196.20	53.00	54.00	30.40
Set	5.6	155.6	215.8	51.00	87.40	89.20	37.00	116.80	51.20	21.00	60.60	97.40	31.80	15.20	99.60
Ott	71.4	59.8	23.4	44.20	7.80	27.80	78.00	10.80	34.00	66.00	35.40	184.40	55.80	0.00	121.40

Nov	90.4	12.6	7.2	53.00	146.20	56.20	187.80	213.20	164.40	92.20	213.00	0.00	173.80	35.80	124.20
Dic	52.2	10.2	49.0	0.00	191.80	43.00	74.80	0.60	1.00	78.40	96.20	0.00	39.00	17.40	5.80

Regime pluviometrico mensile



Figura 3.38: Andamento del regime pluviometrico mensile

3.7.3 Scala annua

L'andamento delle precipitazioni definisce per l'anno 2014 un valore di precipitazione annua pari a 1997.80 mm e il valore più basso che registra il pluviometro è di 514.40 mm e si verifica nel 2017.

Tabella 3.24: definizione delle statistiche di base annue

Statistiche base	
Statistica	Valore
Media	854.43
Deviazione standard	225.18
Valore min	514.40
Valore max	1197.80

Andamento annuo delle precipitazioni

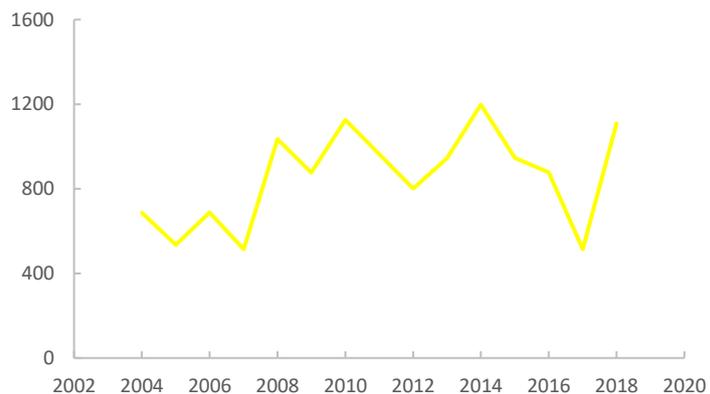


Figura 3.39: Rappresentazione dell'andamento annuo delle precipitazioni

3.8 Analisi dei dati di precipitazione della Stazione Torino Vallere

3.8.1 Scala giornaliera

Per le precipitazioni cumulate giornaliere, la stazione Torino Italgas ha rilevato i dati dal 19/05/2001 al 30/06/2019; di seguito si riporta l'andamento della serie temporale che è caratterizzata da una durata di 18 anni, 1 mese e 11 giorni.

Serie temporale

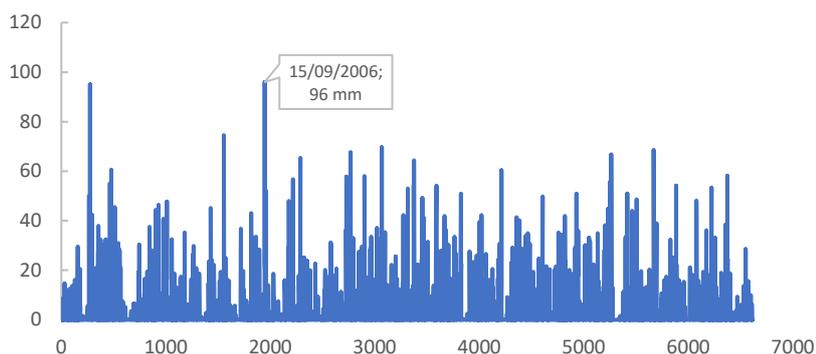


Figura 3.40 Rappresentazione della serie temporale

Vengono di seguito riassunti i valori medi giornaliere delle precipitazioni nei diversi anni di rilevamento, i valori massimi e minimi giornalieri e le somme annue delle piogge.

Tabella 3.25: Definizione dei valori giornalieri max e min e la somma dei dati per ciascun ann

Anno	Somma[mm]	Media	Valore max	Valore min
2002	1512.40	4.14	95.00	0.00
2003	613.60	1.68	46.40	0.00
2004	678.40	1.85	47.80	0.00
2005	584.20	1.60	74.60	0.00
2006	670.40	1.84	96.00	0.00
2007	668.00	1.83	65.40	0.00
2008	985.60	2.69	67.60	0.00
2009	918.80	2.52	69.60	0.00
2010	1025.40	2.81	64.40	0.00
2011	1007.60	2.76	54.20	0.00
2012	733.60	2.00	60.40	0.00
2013	995.80	2.73	49.80	0.00
2014	997.80	2.83	50.80	0.00
2015	858.60	2.35	66.80	0.00
2016	882.00	2.44	68.60	0.00
2017	488.00	1.39	54.20	0.00
2018	980.80	2.72	58.20	0.00

Dall'andamento dei giorni piovosi si nota che nel 2018 si registra il valore massimo di giorni piovosi; dalla rappresentazione dell'andamento medio del numero di giorni piovosi per mese si evince che il mese con un numero minore di giorni piovosi è gennaio.



Figura 3.41: Andamento del numero di giorni piovosi



Figura 3.42: Andamento dei giorni piovosi per mese

3.8.2 Scala mensile

Analogamente a quanto visto per le precedenti stazioni pluviometriche, anche per la stazione Torino Vallere viene eseguita un'analisi a scala mensile dalla quale è possibile valutare l'andamento medio mensile e dal quale si evince come sia il mese di maggio che il mese di giugno risultino essere quelli con valore maggiore di precipitazione media mensile

Tabella 3.26: Valori mensili delle precipitazioni cumulate per gli anni di funzionamento del pluviometro

Mese	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Gen	1.2	63.8	10.6	48.2	48.2	40.6	11.8	39.2	15.6	28.2	11.4	3.4	5.4	92.2
Feb	2.8	39.4	3.0	10.8	27.0	55.4	25.4	4.4	10.4	86.2	95.0	84.6	35.0	53.8
Mar	51.2	13.4	36.4	8.4	66.8	52.8	218.2	36.6	128.6	82.6	140.2	98.4	60.2	64.2
Apr	117.8	23.2	18.2	109.8	269.6	41.8	56.2	121.8	163.6	51.2	73.6	28.4	37.4	80.2
Mag	41.0	84.2	119.6	115.4	33.0	128.0	17.2	182.2	176.4	100.8	46.0	153.4	54.8	199.4
Giu	13.4	54.2	173.8	158.6	46.8	116.4	267.8	32.2	62.2	74.6	96.0	149.4	121.0	78.6
Lug	49.6	58.8	10.6	65.8	65.0	32.2	108.6	51.4	89.8	167.8	13.4	44.6	52.2	102.0
Ago	110.6	38.4	116.4	55.0	49.2	152.2	19.4	22.6	98.0	51.0	138.6	25.8	21.6	15.8
Set	115.8	228.8	74.0	42.6	94.8	54.4	104.4	61.8	24.4	37.4	49.8	39.4	29.6	38.0
Ott	62.6	27.6	52.6	9.6	121.0	74.8	14.6	30.2	56.2	32.8	194.6	55.0	0.0	118.6
Nov	8.4	4.4	52.8	151.8	60.6	193.4	164.0	151.0	95.2	194.2	0.0	142.2	40.6	131.0
Dic	9.8	34.2	0.0	209.6	36.8	83.4	0.0	0.2	75.4	91.0	0.0	57.4	30.2	7.0

Regime pluviometrico mensile

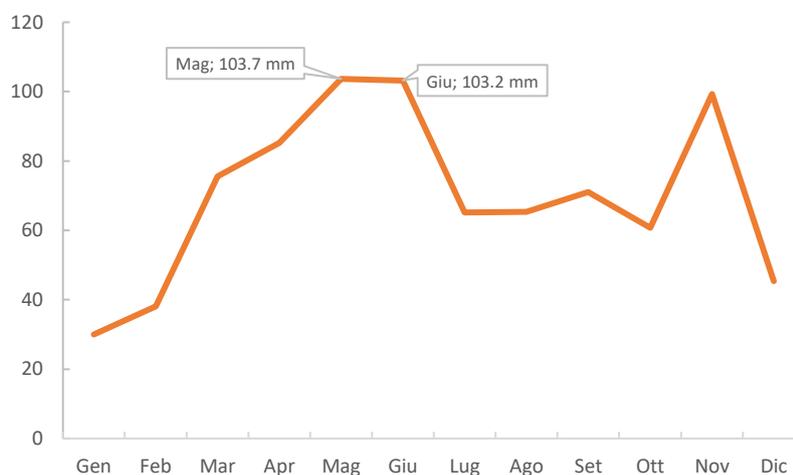


Figura 3.43: Andamento del regime pluviometrico mensile

3.8.3 Scala annua

Dall'andamento annuo delle precipitazioni si osserva che nel 2002 la somma annua è di 152.40 mm mentre il 2017 è l'anno in cui si presenta maggiore siccità.

Tabella 3.27: definizione delle statistiche di base annue

Statistiche base	
Statistica	Valore
Media	858.88
Deviazione standard	242.82
Valore min	488.00
Valore max	1512.40

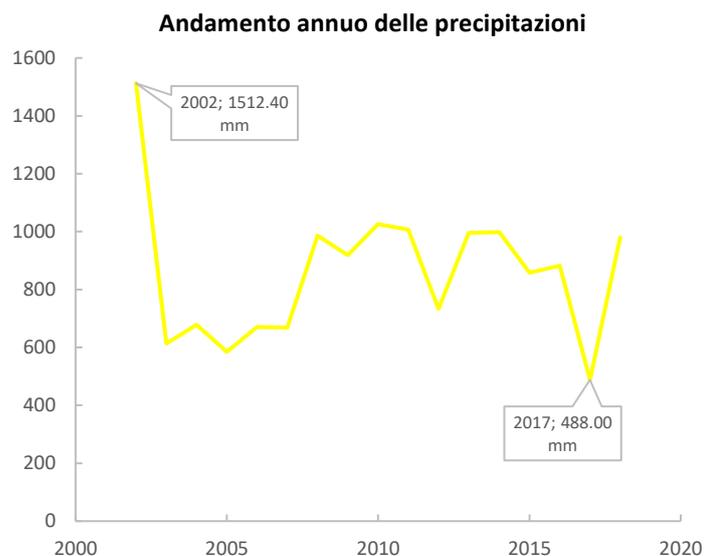


Figura 3.44: Rappresentazione dell'andamento annuo delle precipitazioni

3.9 CONFRONTO DELLE PRECIPITAZIONI GIORNALIERE E MENSILI REGISTRATE DALLE STAZIONI PLUVIOMETRICHE

Il confronto delle precipitazioni giornaliere e mensili, che sono state registrate dalle stazioni pluviometriche prese in esame, consente di definire la correlazione tra i valori registrati e definisce la scelta dei pluviometri che saranno utilizzati per la simulazione del funzionamento del Laboratorio green-court-lab.

Il criterio utilizzato per confrontare i dati registrati dalle diverse stazioni pluviometriche è stato quello di definire una matrice di combinazione (Tabella 3.28) che indica gli anni in cui i dati rilevati dalle stazioni si sovrappongono. Dal confronto dei dati si è potuta definire un'elevata correlazione dei valori di precipitazione mensile rispetto ai valori giornalieri. I dati giornalieri registrati dal pluviometro Torino Buon Pastore sono ben correlati con i dati registrati dalle stazioni Torino Italgas e Torino via della Consolata. Il confronto dei valori giornalieri (ALLEGATO 1), che sono stati rilevati dalle stazioni Torino Giardini Reali e Torino via della Consolata, ha messo in evidenza una buona correlazione dei dati.

Tabella 3.28: Matrice per valutare la correlazione dei dati registrati dalle stazioni pluviometriche prese in esame

ID STAZIONE (periodo di funzionamento)	TO_Italgas (10/11/1192- 22/03/2001)	TO_Giardini Reali (07/08/2004 30/06/2019)	TO_Vallere (18/05/2001 - 30/06/2019)	TO_Reiss Romoli (01/01/2004 - 30/06/2019)	TO_Via della Consolata (20/12/2003 - 30/06/2019)	TO_Buon Pastore (23/03/1989 - 30/08/2004)	TO_Politecnico (11/04/2015 - 25/06/2018)
TO_Italgas (10/11/1192 - 22/03/2001)	0	-	-	-	-	9 anni e 1 mese	-
TO_Giardini Reali (07/08/2004 - 30/06/2019)	-	0	14 anni, 10 mesi e 23 gg	14 anni, 10 mesi e 23 gg	14 anni, 10 mesi e 23 gg	-	3 anni e 2 mesi
TO_Vallere (18/05/2001 - 30/06/2019)	-	14 anni, 10 mesi e 23 gg	0	15 anni, 5 mesi e 29 gg	15 anni, 6 mesi e 10 gg	3 anni e 7 mesi	3 anni e 2 mesi

TO_Reiss Romoli (01/01/2004 - 30/06/2019)	-	14 anni, 10 mesi e 23 gg	15 anni, 5 mesi e 29 gg	0	15 anni, 5 mesi e 29 gg	7 mesi	3 anni e 2 mesi
TO_Via della Consolata (20/12/2003 - 30/06/2019)	-	14 anni, 10 mesi e 23 gg	15 anni, 6 mesi e 10 gg	15 anni, 5 mesi e 29 gg	0	7 mesi	3 anni e 2 mesi
TO_Buon Pastore (23/03/1989 - 30/08/2004)	9 anni e 1 mese	-	3 anni e 7 mesi	7 mesi	7 mesi	0	-
TO_Politecnico (11/04/2015 - 25/06/2018)	-	3 anni e 2 mesi	3 anni e 2 mesi	3 anni e 2 mesi	3 anni e 2 mesi	-	0

Nel confronto della stazione pluviometrica del Politecnico con le stazioni di Torino Giardini Reali e Torino via della Consolata si sono presentati dei valori di precipitazione cumulata giornaliera sfalsati di 24h. I dati giornalieri attribuiti al Politecnico sono stati ottenuti dall'aggregazione dei valori orari rilevati dal sensore 13 della stazione pluviometrica, mentre per le due stazioni automatiche Arpa i dati giornalieri sono stati scaricati dal sito internet nella sezione di accesso ai dati. Una disamina più approfondita è stata condotta nel BOX di approfondimento.

Tenendo conto della presenza dei valori sfalsati, è possibile comunque valutare il confronto e dal quale si evince una buona correlazione dei dati mensili e giornalieri tra le stazioni Torino Politecnico e Torino via della Consolata (Figura 3.45), Torino Politecnico e Torino Giardini Reali (Figura 3.46).

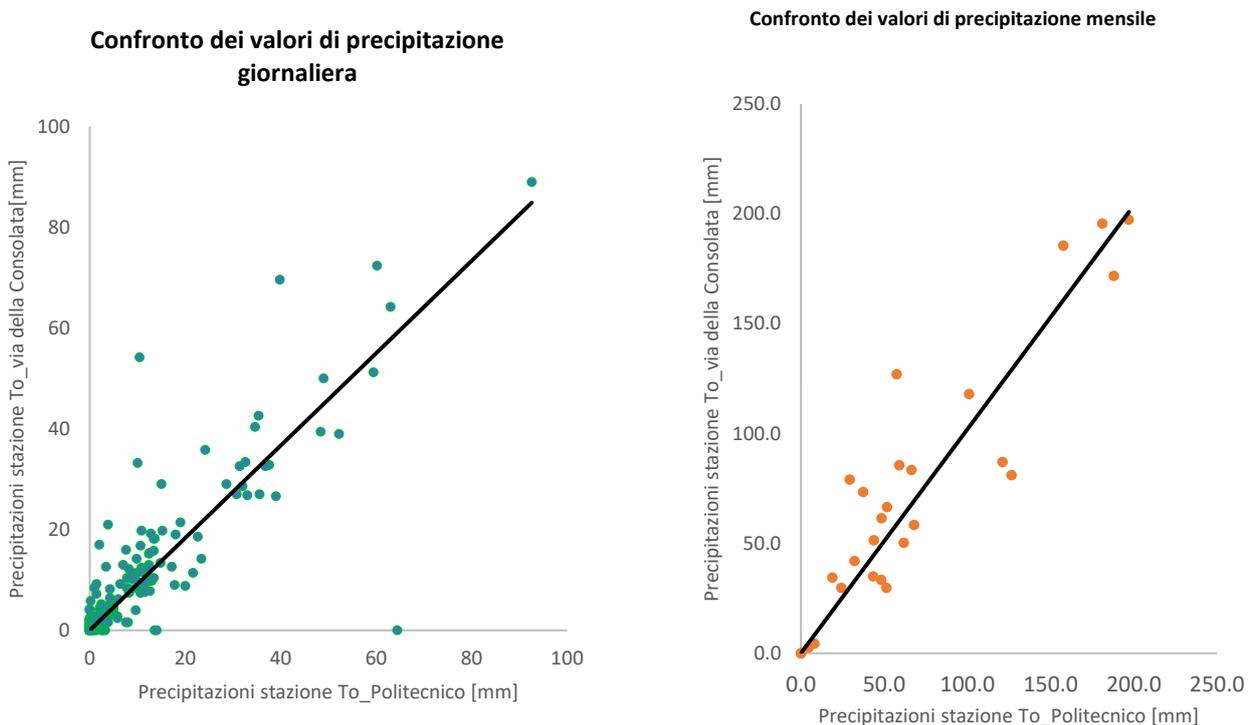


Figura 3.45: Confronto giornaliero e mensile dei dati pluviometrici

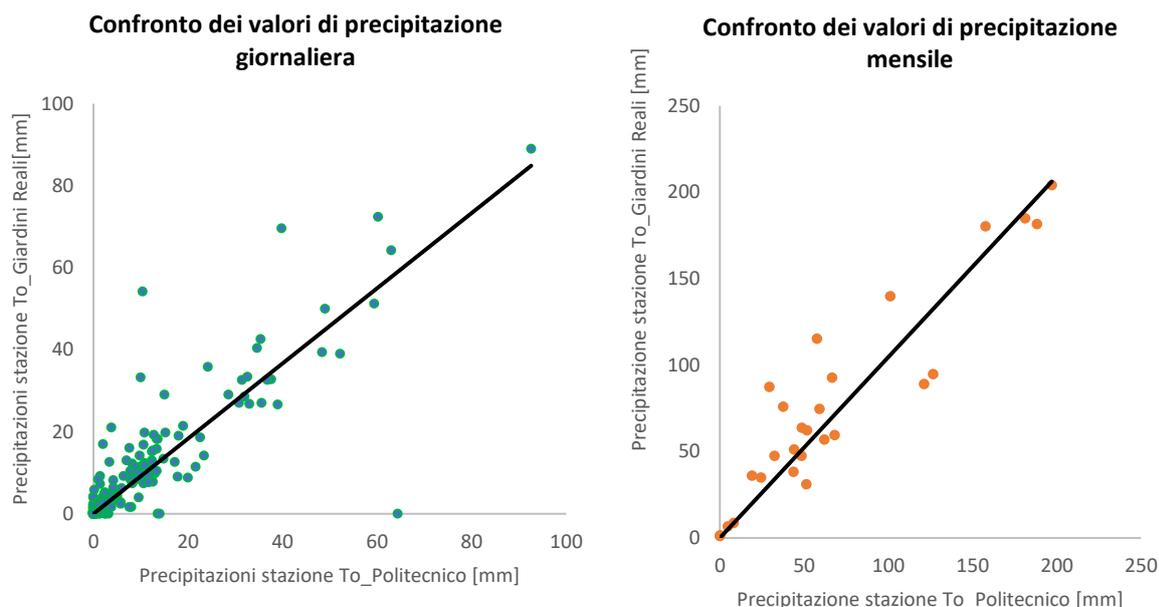


Figura 3.46: Confronto giornaliero e mensile dei dati pluviometrici

La correlazione delle due serie di dati rappresentata nei grafici viene valutata mediante il coefficiente di correlazione lineare mensile (CC_m) e giornaliero (CC_g), valutato in funzione della distanza tra le stazioni pluviometriche. Il coefficiente è valutato come metrica per stabilire la relazione di linearità delle serie valutate, in particolare si evince che più il coefficiente è pari a 1 e meglio questo si distribuisce lungo la bisettrice.

Tabella 3.29: Definizione dell'indice di correlazione dei dati registrati dalle stazioni pluviometriche

Id Stazione pluviometrica	Id Stazione pluviometrica	Distanza [km]	CCm	CCg
TO_Buon Pastore	TO_Via della Consolata	0.59	0.99	0.99
TO_Giardini Reali	TO_Via della Consolata	1.17	0.98	0.97
TO_Politecnico	TO_Via della Consolata	1.93	0.91	0.90
TO_Buon Pastore	TO_Italgas	2.33	0.98	0.97
TO_Politecnico	TO_Giardini Reali	2.52	0.93	0.90
TO_Buon Pastore	TO_Reiss Romoli	3.69	0.99	0.94
TO_Reiss Romoli	TO_Via della Consolata	4.11	0.96	0.91
TO_Giardini Reali	TO_Reiss Romoli	4.83	0.94	0.89
TO_Giardini Reali	TO_Vallere	6.24	0.94	0.87
TO_Vallere	TO_Via della Consolata	6.56	0.93	0.87
TO_Buon Pastore	TO_Vallere	6.93	0.93	0.90
TO_Reiss Romoli	TO_Vallere	10.62	0.91	0.84

Dalla Figura 3.47 è possibile osservare come i due punti, che rappresentano il coefficiente di correlazione mensile dei valori rilevati dalla stazione Torino Politecnico combinati con le stazioni Torino via della Consolata e Torino Giardini Reali, risultano essere lontani dalla bisettrice, il che indica una bassa correlazione rispetto alle altre stazioni.

Dalla Figura 3.48 è possibile notare come la distribuzione del coefficiente di correlazione lineare giornaliera dei valori di precipitazione, registrato dalle diverse stazioni combinate tra loro, si mostra meglio distribuito lungo la bisettrice rispetto a quanto si presenta nel grafico che valuta l'andamento del coefficiente di correlazione lineare mensile; ciò indica una maggiore correlazione lineare giornaliera tra le diverse stazioni.

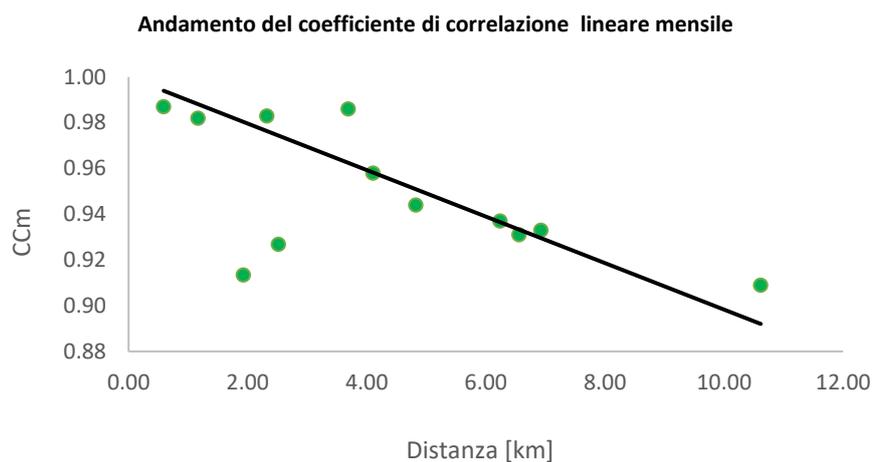


Figura 3.47: Rappresentazione dell'indice di correlazione mensile

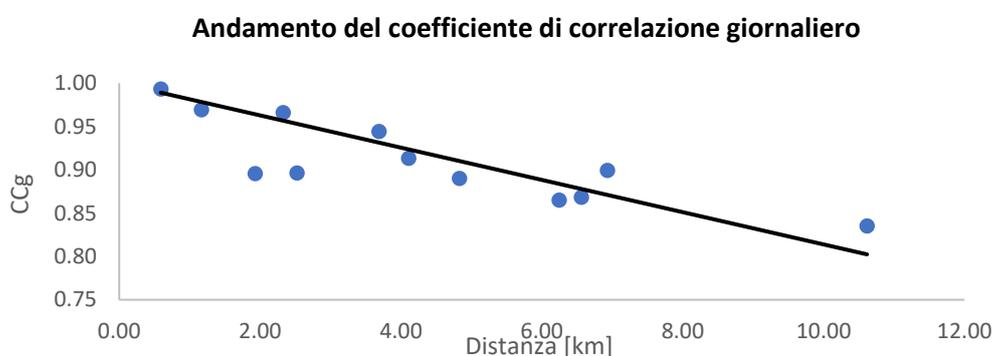


Figura 3.47: Rappresentazione dell'indice di correlazione mensile

Dall'analisi delle precipitazioni è possibile concludere che, per la minore distanza geometrica e per l'elevata correlazione con le stazioni pluviometriche, i dati input che verranno forniti al codice di calcolo per l'esecuzione delle simulazioni si riferiscono ai valori di precipitazione oraria registrati dalle stazioni pluviometriche Torino via della Consolata e Politecnico.

3.9.1 BOX DI APPROFONDIMENTO SUI DATI ORARI E GIORNALIERI DELLA RETE METEOROLOGICA DI ARPA PIEMONTE

A seguito dell'individuazione dello sfalsamento dei dati di precipitazione oraria e mensile registrati dalle stazioni pluviometriche Torino via della Consolata – Torino Politecnico e Torino Giardini Reali – Torino Politecnico si è eseguito un approfondimento sulle registrazioni orarie e giornaliere condotti dalla rete meteorologica di ARPA.

Approfondimento dei dati orari e giornalieri della rete meteorologica di Arpa Piemonte

Si è eseguita una disamina riguardante i valori orari di precipitazione rilevati dalla rete meteorologica di Arpa Piemonte e della stazione del Politecnico.

I dati orari registrati dalle stazioni della rete meteorologica di Arpa Piemonte sono stati richiesti in modalità automatica dal sito dell'ente e i valori presenti nelle elaborazioni sono espressi nel sistema UTC; per individuare l'ora locale occorre sommare un'ora (UTC+1) quando è in vigore l'ora solare (riferita ad un periodo temporale da fine ottobre a fine marzo), mentre invece quando è in vigore l'ora legale (da fine marzo a fine ottobre) si sommano due ore (UTC+2).

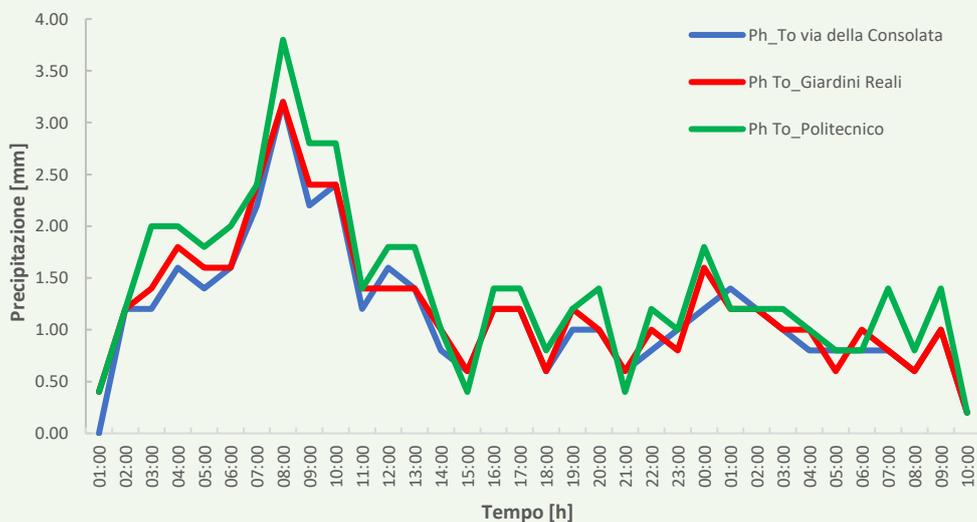
I dati di precipitazione giornaliera rilevati dalla rete meteorologica sono stati ottenuti accedendo al sito di Arpa Piemonte nell'area banca dati meteorologica. Il dato fornito (totale) corrisponde al valore cumulato nelle 24 ore e, per convenzione, viene attribuito al giorno successivo.

A titolo d'esempio si riportano in forma tabellare e grafica l'andamento orario delle precipitazioni del giorno in cui si è verificato un evento di pioggia continua, che è stato registrato dalle stazioni pluviometriche di Torino via della Consolata, Torino Giardini Reali e Torino Politecnico.

Data	Ora (UTC)	Ora locale	Ph To_via della Consolata [mm]	Ph To_Giadini Reali [mm]	Ph To_Politecnico [mm]
20/12/2016	00:00	01:00	0.00	0.40	0.40
	01:00	02:00	1.20	1.20	1.20
	02:00	03:00	1.20	1.40	2.00
	03:00	04:00	1.60	1.80	2.00
	04:00	05:00	1.40	1.60	1.80
	05:00	06:00	1.60	1.60	2.00
	06:00	07:00	2.20	2.40	2.40
	07:00	08:00	3.20	3.20	3.80
	08:00	09:00	2.20	2.40	2.80
	09:00	10:00	2.40	2.40	2.80
	10:00	11:00	1.20	1.40	1.40
	11:00	12:00	1.60	1.40	1.80
	12:00	13:00	1.40	1.40	1.80
	13:00	14:00	0.80	1.00	1.00
	14:00	15:00	0.60	0.60	0.40
	15:00	16:00	1.20	1.20	1.40
	16:00	17:00	1.20	1.20	1.40
	17:00	18:00	0.60	0.60	0.80
	18:00	19:00	1.00	1.20	1.20
	19:00	20:00	1.00	1.00	1.40
	20:00	21:00	0.60	0.60	0.40
	21:00	22:00	0.80	1.00	1.20
	22:00	23:00	1.00	0.80	1.00
23:00	00:00	1.20	1.60	1.80	
21/12/2016	00:00	01:00	1.40	1.20	1.20
	01:00	02:00	1.20	1.20	1.20
	02:00	03:00	1.00	1.00	1.20
	03:00	04:00	0.80	1.00	1.00
	04:00	05:00	0.80	0.60	0.80
	05:00	06:00	0.80	1.00	0.80
	06:00	07:00	0.80	0.80	1.40
	07:00	08:00	0.60	0.60	0.80
	08:00	09:00	1.00	1.00	1.40
09:00	10:00	0.20	0.20	0.20	

Graficamente è possibile osservare come l'andamento orario rilevato dalle stazioni Arpa è quasi sovrapponibile durante l'arco orario dalle 6:00 alle 9:00, dalle 15:00 alle 18:00, dalle 20:00 alle 21:00; invece il confronto dei valori Arpa con i valori rilevati dalla stazione del Politecnico mette in luce, seppur di poco, una diversa distribuzione oraria dei dati, con una differenza di 0.40 mm di precipitazione rilevata alle 8:00 del 20/12/2016.

Andamento orario delle precipitazioni per il giorno 20/12/2016



La tabella sottostante mostra i valori giornalieri di precipitazione in millimetri per le tre stazioni pluviometriche

Stazioni	Valori Pg dalle 0:00 alle 0:00	Valori Pg dalle 9:00 alle 9:00
To_Giardini Reali	33.4	26
To_via della Consolata	31.2	25.2
To_Politecnico	36.8	29.8

4 IL CODICE DI CALCOLO EPA-SWMM PER LA MODELLAZIONE NUMERICA

4.1 Descrizione generale del programma di calcolo

La modellazione numerica del Laboratorio green-court-lab è stata eseguita mediante l'ausilio del codice di calcolo EPA-SWMM (versione 5.1). Il modello di gestione delle acque meteoriche (Storm Water Management Model - SWMM) è stato sviluppato per la prima volta nel 1971 dal Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency (EPA) statunitense ed è stato poi sottoposto a diversi importanti aggiornamenti. Il programma di calcolo viene principalmente impiegato per la pianificazione, l'analisi e la progettazione relative al deflusso delle acque meteoriche, ai sistemi di fognatura mista e nera, ai sistemi di allontanamento e laminazione delle acque meteoriche in aree urbane (Figura 4.1) e applicazioni in aree non urbane (Rossman, 2015).

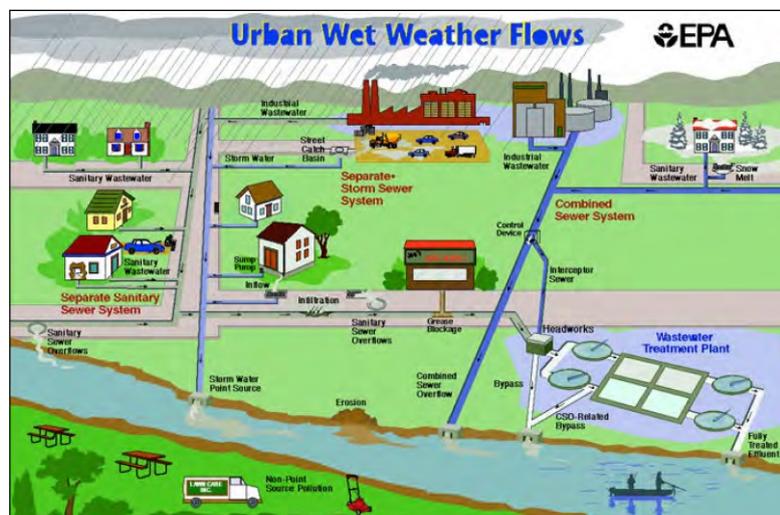


Figura 4.1: Elementi di un tipico sistema di drenaggio urbano (Rossman, et al., 2015)

SWMM è un modello di simulazione dinamica in grado di simulare i processi di trasformazione afflussi-deflussi, di riprodurre il movimento del deflusso causato dalle precipitazioni e di ricreare l'accumulo, il trattamento degli inquinanti e il loro trasporto dalla superficie del bacino alla rete di canali e condotte che costituiscono il sistema di drenaggio urbano; è inoltre usato per simulare la quantità e qualità del deflusso superficiale in aree prevalentemente urbane. In SWMM la componente di deflusso opera su un insieme di sottobacini che ricevono le acque meteoriche e generano deflusso (runoff) e carichi inquinanti. La componente di routing convoglia il deflusso attraverso un sistema di tubi, canali, dispositivi di accumulo/trattamento, pompe e regolatori (Gironas, et al., 2009).

SWMM è caratterizzato da una struttura a moduli:

- Modulo idrologico: simula i vari processi idrologici che producono il deflusso dalle aree urbane. Questi includono: precipitazioni variabili nel tempo, accumulo/scioglimento della neve, evaporazione d'acqua, infiltrazione di pioggia negli strati insaturi del terreno, percolazione di acqua infiltrata in falda, interflow tra la falda acquifera e il sistema di drenaggio, infiltrazione ed evaporazione delle precipitazioni e dei deflussi dovuti all'utilizzo di pratiche a basso impatto ambientale (LID).
Nei diversi processi idrologici si tiene conto della variabilità spaziale attraverso la suddivisione dell'area di studio in un insieme di sottobacini che ricevono le precipitazioni e generano carichi inquinanti (Rossman, 2015).
- Modulo idraulico: riproduce la propagazione dei deflussi di piena all'interno dei collettori, attraverso l'equazione di Saint Venant (Perin, et al., 2019), consente la modellazione di reti di

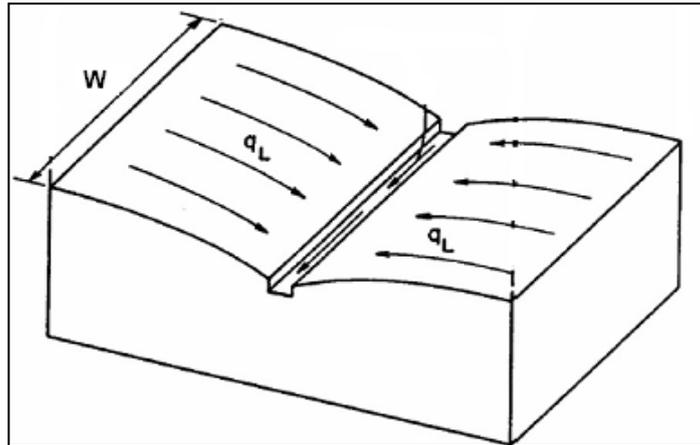


Figura 4.3: Schematizzazione di un subcatchment su SWMM (Rossman, et al., 2015).

Per stimare il deflusso superficiale determinato dalle precipitazioni su ciascun sottobacino, il codice di calcolo modella il subcatchment come un serbatoio non lineare con un unico ingresso rappresentato dalle precipitazioni (afflussi) e molteplici uscite definite da infiltrazione, evapotraspirazione e deflusso superficiale (Figura 4.4).

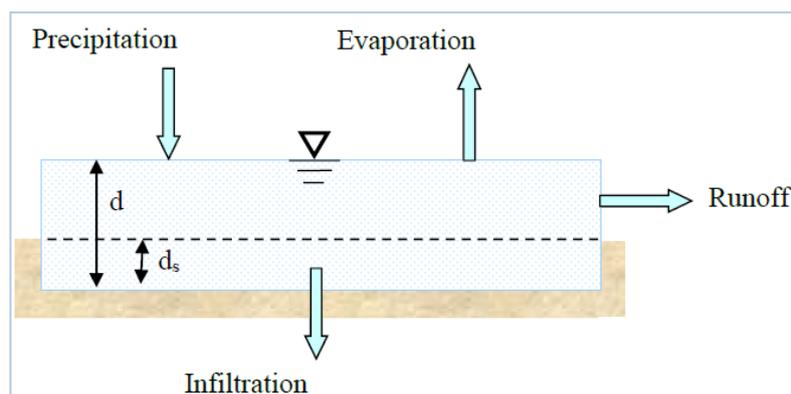


Figura 4.4: Modello di serbatoio non lineare per il subcatchment (Rossman, et al., 2015)

La capacità del serbatoio è definita come la massima capacità di immagazzinamento nelle depressioni che sono caratterizzati da avvallamenti e irregolarità superficiali, nei quali l'acqua viene intercetta e ristagnata (Rossman, et al., 2015).

Il deflusso superficiale, si verifica tutte le volte in cui l'altezza d'acqua nel serbatoio (d) supera la profondità massima nelle depressioni (d_s), e in termini di portata volumetrica (Q) si definisce mediante l'equazione di Manning (4.1):

$$Q = \frac{1.49}{n} W S^{1/2} (d - d_s)^{5/3} \quad (4.1)$$

dove " Q " è il deflusso superficiale, " W " è la larghezza del sottobacino, " n " è il coefficiente di scabrezza di Manning, " d " è l'altezza d'acqua, " d_s " è la profondità di stoccaggio, " S " è pendenza media del sottobacino (Rossman, et al., 2015).

Tale equazione viene risolta rispetto ad un subcatchment che può essere caratterizzato da un'area permeabile, che consente alle precipitazioni di infiltrarsi e un'area impermeabile per la quale non si verificano infiltrazioni. Inoltre, in alcuni casi, a seguito del verificarsi di un evento piovoso, è possibile che vengano generati deflussi prima che la profondità di stoccaggio in depressione si riempia. Il codice di calcolo modella tale comportamento considerando l'area impermeabile suddivisa in due sottoaree

caratterizzate da presenza di deposito in depressione o dall'assenza e in tal caso il parametro % Zero-Imperv indica la percentuale di area deputata alla generazione immediata del deflusso. Generalmente la struttura del subcatchment si costituisce di tre aree (Figura 4.5) che recapitano il deflusso verso il nodo di uscita (Rossman, et al., 2015).

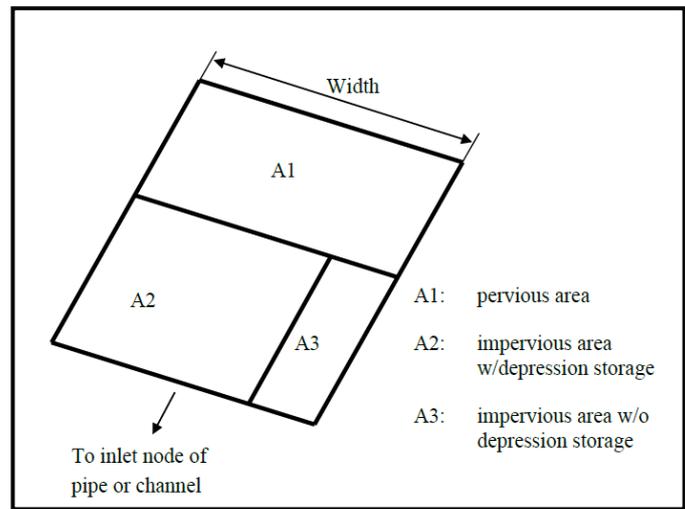


Figura 4.5: Suddivisione del subcatchment per il deflusso superficiale (Rossman, et al., 2015)

A seguito di tale precisazione, l'equazione (4.1) viene risolta per ciascuna sottoarea che caratterizza il subcatchment. Al termine di ciascun istante temporale, rispetto al quale viene eseguita la simulazione, i contributi di deflusso provenienti dalle tre sottoaree del subcatchment contribuiscono a definire il ruscellamento totale.

4.3 Modello Idraulico

Nel codice di calcolo la modellazione dei deflussi nel sistema fognario viene eseguito mediante il modulo idraulico. In SWMM il sistema di trasporto di un sistema di drenaggio viene rappresentata mediante una rete di collegamenti (tubi o canali) connessi a dei nodi (Figura 4.6) (Rossman, 2015).

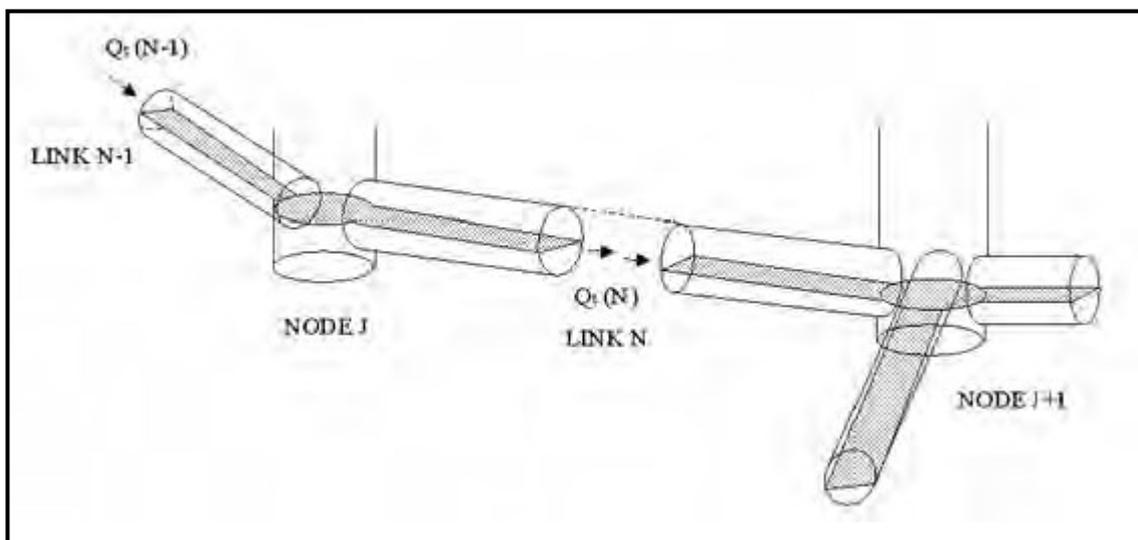


Figura 4.6: Rappresentazione di una rete di trasporto in SWMM (Rossman, 2017)

Il modulo idraulico consente la risoluzione delle equazioni di continuità e di quantità del moto, note come equazioni di St. Venant, nella forma monodimensionale per la determinazione del livello

dell'acqua all'interno di ciascun nodo e l'andamento nel tempo della portata e la velocità all'interno di ogni collegamento nelle diverse fasi del periodo di simulazione (Rossman, 2017).

Le equazioni di St. Venant sono definite dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{equazione di continuità} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad \text{equazione della quantità moto} \quad (4.3)$$

in cui A è l'area della sezione trasversale, Q la portata, x la coordinata spaziale lungo il collettore, t il tempo, g l'accelerazione di gravità, H = z + y la quota del pelo libero, z la quota del fondo del collettore, y il tirante idrico, S_f la cadente della linea dei carichi totali. La cadente S_f può essere espressa mediante l'equazione di Manning:

$$S_f = \left(\frac{n}{1.486}\right)^2 \frac{Q|U|}{AR^{4/3}} \quad (4.4)$$

in cui, n è il coefficiente di scabrezza di Manning, R il raggio idraulico della sezione trasversale, U la velocità del flusso pari a Q/A e 1.486 un fattore di conversione (Rossman, 2017).

Per una specifica geometria della sezione trasversale, la superficie A è funzione dell'altezza d'acqua Y, che può essere determinata dal carico idraulico H. Nelle equazioni di St. Venant le variabili dipendenti risultano essere Q e H, funzioni di spazio e tempo. La risoluzione delle equazioni deve essere condotta considerando delle condizioni iniziali per le variabili dipendenti, ovvero all'istante iniziale si assumono le condizioni al contorno per x = 0 e x=L.

Combinando le equazioni (4.2) e (4.3) si definisce l'equazione della quantità di moto nella seguente forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} - gA \frac{\partial H}{\partial x} - gAS_f \quad (4.5)$$

L'equazione (4.5) è riferita a ciascun collettore, è necessario introdurre l'equazione di continuità che è definita per ogni nodo:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \sum \frac{Q}{A_x} \quad (4.6)$$

nella quale A_s rappresenta la superficie dello specchio liquido attribuibile ad ogni nodo e Q flusso nel nodo (Rossman, 2017).

La risoluzione delle equazioni di St. Venant viene condotta alle differenze finite dove si ricava la portata procedendo per steps temporali successivi, i cui risultati vengono inseriti nell'equazione di continuità al nodo per aggiornare le quote del pelo libero (Perin, et al., 2019).

Tali equazioni possono essere risolte utilizzando due possibili metodi: analisi dell'onda cinematica (kinematic wave) o dell'onda dinamica (dynamic wave). L'analisi dell'onda dinamica consente di risolvere le equazioni di St. Venant in forma completa e ciò consente di avere dei risultati più accurati, simulando i fenomeni di rigurgito, il funzionamento in pressione delle condotte e gli effetti dovuti alle perdite di carico ed inoltre, per garantire la stabilità numerica si utilizzano piccoli passi temporali durante la simulazione. Mentre la risoluzione delle equazioni mediante l'analisi dell'onda cinematica consente di trascurare i termini inerziali ed il gradiente di pressione. SWMM consente di eseguire simulazioni con l'opzione di steady flow (in condizioni di moto permanente) nel caso in cui le grandezze d'ingresso al sistema risultino uniformi e costanti nel tempo (Rossman, 2017).

4.4 LID (Sviluppo a Basso Impatto)

Tecniche innovative per la gestione delle acque meteoriche urbane risultano essere le tecnologie con sviluppo a basso impatto (Low Impact Development - LID). Nel codice di calcolo tali tecnologie sono modellate mediante l'oggetto LID Controls. Le tecniche LID consentono di intercettare il deflusso superficiale e parte del quale verrà immagazzinato, parte si infiltrerà e la restante parte verrà evapotraspirata. SWMM consente di modellare diverse tipologie di tecnologie a basso impatto ambientale: vasche di bio-ritenzione (bio-retention cells), "giardini pluviali" (rain gardens), tetti verdi (green roofs), pavimentazioni permeabili (permeable pavements), cisterne-vasche per la raccolta delle acque piovane (rain barrels), canali inerbiti (vegetative swales) e trincee di infiltrazione (infiltration trenches) (Figura 4.7) (Rossman, 2015).



Figura 4.7: Rappresentazione delle tecnologie LID che SWMM è in grado di modellare (Rossman, 2015)

Nel programma i LID Controls sono definiti come una combinazione di strati verticali (Figura 4.8) le cui proprietà sono assegnate per unità di area. Gli strati da definire sono:

- Surface Layer, rappresenta lo strato superficiale che riceve precipitazioni dirette e il deflusso proveniente dalle aree a monte dalle piogge e dal deflusso prodotto dalle aree a monte, ne immagazzina l'afflusso nelle depressioni e superata la capacità di stoccaggio, produce deflusso superficiale che entra nel sistema di drenaggio defluendo a valle;
- Pavement Layer, è lo strato di pavimentazione che è utilizzato per le pavimentazioni permeabili come strato in calcestruzzo poroso o asfalto e nei sistemi di pavimentazione modulare rappresenta il blocco di pavimentazione e il materiale di riempimento;
- Soil Layer, è lo strato di terreno che nelle pratiche LID è rappresentato da una miscela di terriccio che ne garantisce la crescita vegetativa;
- Storage Layer, è lo strato di accumulo e rappresenta un letto di materiale roccioso o ghiaia frantumata che consente il deposito di acqua nelle vasche di bio-ritenzione, nei pavimenti porosi e nelle trincee drenanti;
- Drain Sistem, è il sistema di scarico che convoglia l'acqua all'esterno dello storage layer verso l'uscita attraverso una condotta o una camera di raccolta (Rossman, 2015).

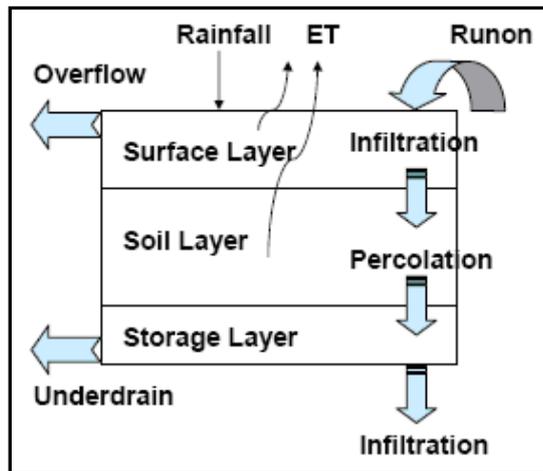


Figura 4.8: Schema concettuale di un LID Controls (Rossman, 2015)

Le tecniche LID consentono l'aumento della capacità di immagazzinamento e di evaporazione delle acque meteoriche (ad eccezione dei serbatoi), inoltre, possono incrementare l'infiltrazione per quei sistemi in cui non sono previsti strati con fondo impermeabile. In SWMM i LID Controls sono posizionati all'interno di un subcatchment mediante due diverse modalità (Rossman, 2015):

- Collocare le tecniche LID su un subcatchment esistente. Tale modalità consente di disporre diversi LID all'interno di un sottobacino e simulare il loro funzionamento in parallelo ma non in serie. Inoltre, si deve tener conto della calibrazione delle proprietà "Percent Impervious" e "Width" (Figura 4.9), per tener conto della frazione di subcatchment che è stata occupata dal LID.
- Definire un nuovo subcatchment dedicato alle pratiche LID. Questa modalità consente ai LID Controls di essere collegati in serie e di convogliare il deflusso proveniente da monte.

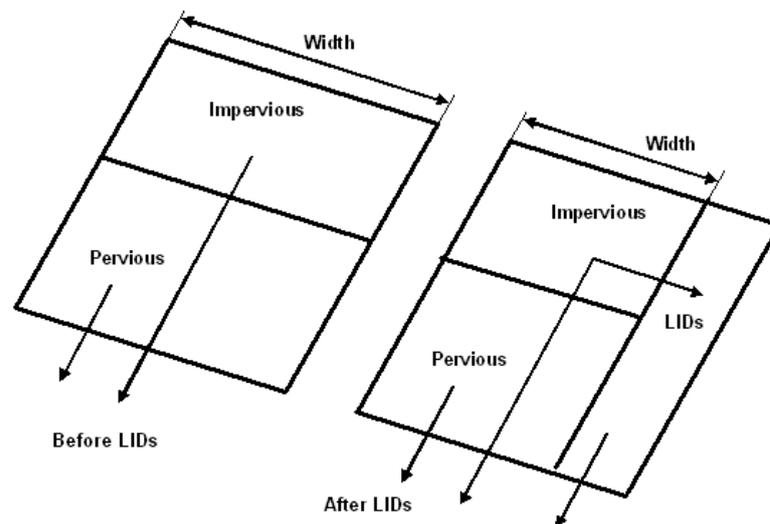


Figura 4.9: Modellazione dei parametri del subcatchment dopo la collocazione dei LID Controls (Rossman, 2015)

5 MODELLAZIONE NUMERICA DEL LABORATORIO

Nell'ambito del caso studio in esame, la modellazione idraulica viene eseguita mediante l'utilizzo del software SWMM e ha come obiettivo l'analisi del funzionamento del Laboratorio a cielo aperto sottoposto all'azione di eventi meteorici di diversa portata. Il codice di modellazione consente di realizzare una schematizzazione (Figura 5.1) fisica e concettuale del sistema in esame.



Figura 5.1: Schematizzazione del Laboratorio green-court-lab mediante il codice SWMM

Gli oggetti principali che sono stati utilizzati per la modellazione numerica del sistema sono: Rain Gage, Subcatchments e LID Controls appartenenti al modulo idrologico; Junctions, Outfall, Storage Unit, Conduit, Regulator e Pump che riguardano il modulo idraulico e altri oggetti come curve e regole di controllo, che sono stati utilizzati per caratterizzare e controllare il comportamento del sistema di pompaggio collocato all'interno della vasca di prima pioggia. La tabella 5.1 fornisce un riepilogo dei vari oggetti utilizzati in SWMM (Rossman, 2015).

Tabella 5. 1: Oggetti di modellazione di SWMM (Rossman, et al., 2015)

Categoria	Tipo di oggetto	Descrizione
Hydrology	Rain Gage	Fonte dei dati di precipitazione in uno o più sottobacini.
	Subcatchments	Una sezione della superficie in esame che riceve le precipitazioni associate ad un rain gage e produce deflusso che si riversa in un nodo del sistema di drenaggio o in un altro subcatchment.
	Aquifer	Un'area del sottosuolo che riceve infiltrazioni dal subcatchment soprastante e scambia flusso di acqua con un nodo del sistema di convogliamento.
	Snow Pack	Neve accumulata che ricopre un subcatchment.
	Unit Hydrograph	Una funzione di risposta che descrive la quantità di afflusso/infiltrazione fognaria generata nel tempo per unità di pioggia istantanea.
	Junction	Un punto del sistema di trasporto in cui i condotti si collegano tra loro con un volume di stoccaggio trascurabile (ad esempio, tombini, raccordi per tubazioni e giunzioni di flusso).
	Outfall	Un punto finale del sistema di trasporto in cui l'acqua viene scaricata.

Hydraulic	Divider	Un punto del sistema di trasporto in cui l'afflusso si divide in due condotti di scarico secondo un rapporto noto.
	Storage Unit	Uno stagno, un lago, un bacino che fornisce l'immagazzinamento dell'acqua.
	Conduit	Un canale o un tubo che trasporta l'acqua da un nodo del sistema di trasporto ad un altro.
	Pump	Un dispositivo che solleva la prevalenza idraulica dell'acqua.
	Regulator	Uno stramazzo o un orificio utilizzato per indirizzare e regolare il flusso tra due nodi del sistema di trasporto.
Water Quality	Pollutant	Un inquinante che può accumularsi ed essere rimosso dalla superficie del terreno o introdotto direttamente nel sistema di trasporto.
	Land Use	Una classificazione utilizzata per caratterizzare le funzioni che descrivono l'accumulo e la rimozione degli inquinanti.
Treatment	LID Control	Un controllo dello sviluppo a basso impatto (LID), come celle di bioritenzione, la pavimentazione permeabile o uno swale vegetato, utilizzati per ridurre il deflusso superficiale mediante il contributo dell'infiltrazione.
	Treatment Function	Una funzione definita dall'utente che descrive come le concentrazioni di inquinanti vengono ridotte in un nodo del sistema di trasporto in funzione di alcune variabili, come la concentrazione, la portata, la profondità dell'acqua, ecc.
Data Object	Curve	Una funzione che definisce la relazione tra due grandezze (ad es. portata e prevalenza idraulica per una pompa, superficie e profondità per un nodo di stoccaggio, ecc.)
	Time Series	Una funzione che descrive il mondo in cui una quantità varia con il tempo (ad es. piogge, altezza della superficie nella foce, ecc.)
	Time Pattern	Un insieme di fattori che si ripetono per un periodo di tempo (ad esempio, schema orario diurno, schema giornaliero settimanale, ecc.)
	Control Rules	Istruzioni IF-THEN-ELSE che determinano quando vengono intraprese specifiche azioni di controllo (ad esempio, accendere o spegnere una pompa quando la profondità di flusso in un dato nodo è superiore o inferiore a un determinato valore).

Nei paragrafi successivi verranno descritti nel dettaglio gli oggetti utilizzati per la modellazione numerica del Laboratorio.

5.1 Rain gage

I dati di precipitazione sono forniti al codice di calcolo mediante l'oggetto Rain Gage con un file, definito sulla base dei valori registrati da stazioni pluviometriche collocate nelle vicinanze del bacino idrografico. Le caratteristiche da assegnare al Rain Gage sono: i dati di precipitazione (forniti come intensità di pioggia o volume), l'intervallo di tempo associato ad ogni lettura, la fonte dei dati (il nome di un oggetto Time Series o il nome di un Rainfall file) e il nome della stazione pluviometrica (Rossman, 2015).

Per il presente lavoro di tesi sono stati elaborati tre diversi file esterni, Rainfall file, che si riferiscono alle tre diverse simulazioni eseguite considerando un anno umido (2010), un anno secco (2017), e un anno di precipitazione media (2016).

Ciascun file presenta per ogni riga ID della stazione, anno, mese, giorno, ora, minuto e la lettura delle precipitazioni che si riferiscono ai valori di intensità di pioggia. Un estratto di uno dei tre file di dati utilizzato per la simulazione dell'anno umido è riportato in Figura 5.2.

STA	2010	2	26	1	0	0.80
STA	2010	2	26	2	0	1.00
STA	2010	2	26	3	0	1.40
STA	2010	2	28	0	0	0.20
STA	2010	2	28	8	0	0.20
STA	2010	2	28	9	0	0.20
STA	2010	2	28	10	0	0.40
STA	2010	2	28	11	0	0.20
STA	2010	2	28	13	0	0.40
STA	2010	3	3	13	0	2.60

Figura 5.2: Estratto del Rainfall file per la simulazione dell'anno umido

5.2 Modellazione delle coperture

Le coperture presenti nell'area di studio, tetti a falde e tetti piani, sono state modellate mediante 11 subcatchments (Figura 5.3). I subcatchments sono unità idrologiche del sistema di drenaggio che convogliano il deflusso verso un unico punto di scarico, definito Outlet. Il punto di scarico di ciascun sottobacino-copertura è individuato dal pozzetto pluviale in calcestruzzo che ha il compito di smaltire le acque piovane provenienti dai pluviali. Alle coperture a falde sono stati assegnate: proprietà di impermeabilità, pendenza della falda pari al 30% e un valore di depression storage, ovvero stoccaggio in depressione, pari a 0.05 mm. Le coperture piane sono caratterizzate da superfici impermeabili, pendenza pari al 2% e un valore di depression storage uguale a 0.1 mm; tale valore risulta essere maggiore rispetto a quanto assegnato per i tetti a falde in quanto hanno una più lenta capacità di deflusso immediato delle acque data la pendenza inferiore.

I principali parametri che sono stati assegnati a ciascun subcatchment sono:

- Rain Gage: oggetto che è utilizzato per rappresentare i dati di precipitazione;
- Outlet: nodo di uscita del deflusso di ciascun sottobacino;
- Area: area del subcatchment attraverso la quale scorre il deflusso;
- Width: larghezza del sottobacino, generalmente una sua buona stima è ottenuta dividendo l'area del subcatchment per la lunghezza massima media del deflusso superficiale;
- %Slope: pendenza del subcatchment;
- %Imperv: percentuale di impermeabilità del subcatchment;
- N-Imperv: coefficiente di scabrezza di Manning per aree impermeabili dei subcatchments;
- %Zero_Imperv: percentuale di area che si riferisce alla produzione immediata di deflusso (Rossman, et al., 2015), assumendo per tale parametro il valore 0 si indica che l'acqua meteorica che precipita sui tetti viene nell'immediato smaltita e per mezzo dei pluviali raggiunge i pozzetti.

Nella tabella 5.2 si riportano i valori dei parametri assegnati ai subcatchments delle coperture.

Tabella5.2: Proprietà principali assegnate ai subcatchments delle coperture.

SUBCATCHMENTS						
Sub ID	Outlet	Area [ha]	Width	%Slope	N-Imperv	%Zero/Imperv
Sub01	JP3	0.0066	12.6	30.0	0.011	0.0
Sub02	JP4	0.0066	12.7	30.0	0.011	0.0
Sub03	JP5	0.0066	12.9	30.0	0.011	0.0
Sub04	JP5	0.0077	9.1	2.0	0.011	0.0
Sub05	JP6	0.0077	9.1	2.0	0.011	0.0
Sub06	JP6	0.0067	12.9	30.0	0.011	0.0
Sub07	JP7	0.0067	12.7	30.0	0.011	0.0
Sub08	JP1	0.0067	12.6	30.0	0.011	0.0
Sub09	JP1	0.0044	9.5	2.0	0.011	0.0
Sub010	JP2	0.0044	9.5	2.0	0.011	0.0
Sub011	JP3	0.0044	9.5	2.0	0.011	0.0

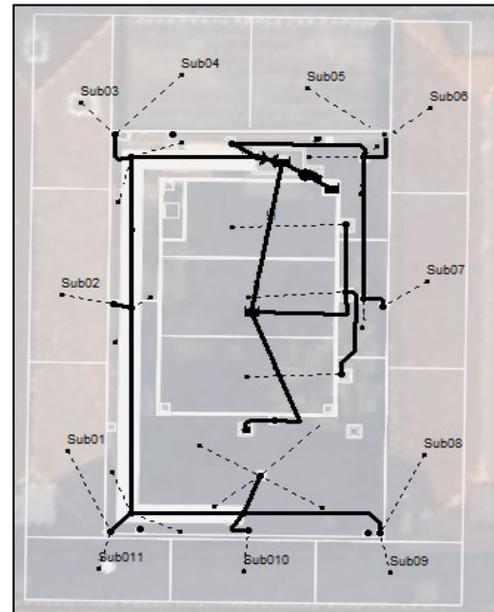


Figura 5.3: Rappresentazione dei subcatchments delle coperture sul modello

5.3 Modellazione della pavimentazione

La pavimentazione del laboratorio sarà realizzata in cubetti (10 x 10 x 10 cm) di porfido ed è stata schematizzata nel codice SWMM attraverso subcatchments (Figura 5.4) con superfici impermeabili e depression storage pari a 0.1 mm.

Le proprietà assegnate ai sottobacini sono riassunte nella tabella 5.3.

Tabella5.3: Proprietà principali assegnate ai subcatchments della pavimentazione

SUBCATCHMENTS						
Sub ID	Outlet	Area [ha]	Width	%Slope	%Imperv	N-Imperv
Sub012	JCG2	0.00074	9.3	1	100	0.016
Sub013	JCG3	0.00075	9.4	1	100	0.016
Sub014	JCG4	0.00075	9.4	1	100	0.016
Sub015	JCG4	0.00066	8.3	1	100	0.016
Sub016	JPC1	0.0021	3.28	1	100	0.016
Sub017	JPC1	0.00356	3.87	1	100	0.016
Sub018	JPC1	0.00355	3.86	1	100	0.016
Sub019	JPC1	0.00499	6.84	1	100	0.016
Sub020	JPC2	0.001506	3.3	1	100	0.016
Sub021	JPC2	0.00145	3.3	1	100	0.016
Sub022	JPC3	0.00176	4.67	1	100	0.016
Sub023	JPC3	0.00034	1.42	1	100	0.016
Sub024	JPC3	0.0025	3.4	0.5	100	0.015
Sub025	JCG1	0.00132	9.4	1	100	0.016
Sub026	JCG1	0.00051	7.3	1	100	0.016
Sub027	JCG3	0.00211	17.3	1	100	0.016
Sub028	JCG4	0.00108	100	0.24	100	0.017
Sub029	JCG2	0.00321	100	0.4	100	0.017
Sub030	JCG1	0.00112	100	0.24	100	0.017



Figura 5.4: Schematizzazione dei subcatchments della pavimentazione mediante SWMM

5.4 Modellazione del canale di raccolta

Il canale di raccolta delle acque piovane, coperto da griglia carrabile, consentirà il convogliamento delle acque meteoriche provenienti dai pluviali e dai pozzetti caditoie all'interno della vasca di prima pioggia. La modellazione del canale è stata eseguita a partire dalla sua suddivisione in tratti (Figura 5.6). Il canale in calcestruzzo è già esistente, di sezione rettangolare, larghezza pari a 1.30 m e altezza dipendente dalla pendenza topografica del terreno.

I quattro tratti che caratterizzano il canale vengono rappresentati nel programma come un sistema di nodi e links. In SWMM i nodi sono caratterizzati da due parametri principali: invert elevation, ovvero la quota di fondo e max depth che rappresenta la massima profondità (Tabella 5.4). I nodi sono collegati da condotte di forma rettangolare e sezione trasversale aperta. I principali parametri di input che sono stati definiti per il canale (Figura 5.5) sono: l'altezza di offset, l'altezza del canale che varia in funzione delle quote topografiche del terreno, la lunghezza del condotto, il coefficiente di scabrezza di Manning, la geometria della sezione del canale (Rossman, 2015).



Figura 5.5: Rappresentazione della sezione trasversale del canale aperto (Rossman, 2015)

Tabella 5.4: Proprietà principali assegnate ai nodi di collegamento dei tratti che caratterizzano il canale di raccolta

JUNCTIONS		
JunID	Inv.El. [m]	Max. Depth [m]
JCG1	-1.00	1.00
JCG2	-0.98	0.98
JCG3	-0.91	0.91
JCG4	-0.88	0.88
JCG5	-0.86	0.86

Tabella 5.5: Proprietà principali assegnate alle condotte che caratterizzano il canale di raccolta

CONDUITS							
ConID	Inlet Node	Outlet Node	Sez. trasversale	Altez [m]	Largh	Length [m]	n Manning
CGC1	JCG1	JCG2	Rect_open	0.980	1.300	8.60	0.015
CGC2	JCG2	JCG3	Rect_open	0.940	1.300	10.52	0.015
CGC3	JCG3	JCG4	Rect_open	0.910	1.300	16.76	0.015
CGC4	JCG4	JCG5	Rect_open	0.910	1.300	8.30	0.015

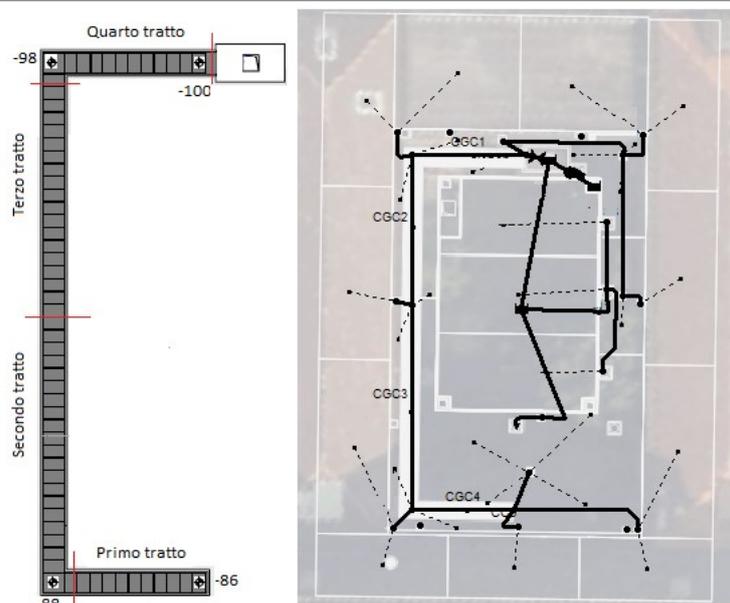


Figura 5.6: Sezione trasversale del canale di raccolta

Ai quattro tratti che costituiscono il canale sono stati assegnati 4 subcatchments, con superfici impermeabili e aree elevate; tale modellazione consente alle acque meteoriche di giungere direttamente sul fondo del canale.

5.5 Modellazione dei pozzetti

Nel Laboratorio green-court-lab sono presenti differenti tipologie di pozzetti, in particolare si hanno:

- 7 pozzetti piede pluviali (JP) in calcestruzzo di dimensioni 300 x 300, dove ciascuno è collocato in prossimità del pluviale con il compito di smaltire le acque meteoriche provenienti dalle grondaie sulle coperture;
- 3 pozzetti caditoia (Figura 5.7) in ghisa sferoidale (JPC) che intercettano le acque meteoriche che scorrono sulla pavimentazione del laboratorio;
- Pozzetto di alloggiamento valvola antiriflusso (JPAVA), è il pozzetto di collegamento della vasca di raccolta con la linea bianca del sistema fognario, è dotato di valvola antiriflusso che consente il deflusso delle acque nella rete fognaria e impedisce il riflusso durante i periodi di sovraccarico della rete;
- 3 pozzetti per analisi in calcestruzzo (JPA) posizionati nella zona longitudinale destra del verde pensile e sono i punti di scarico dei dreni delle celle di bioritenzione, in particolare il pozzetto JPA2 (Figura 5.8) raccoglie le acque provenienti dai due pozzetti e dai dreni e le convoglia all'interno della vasca di raccolta mediante una tubazione in polietilene
- pozzetto di raccolta caditoie (JPRC) convoglia le acque provenienti dalle 3 caditoie all'interno del canale di raccolta delle acque meteoriche.

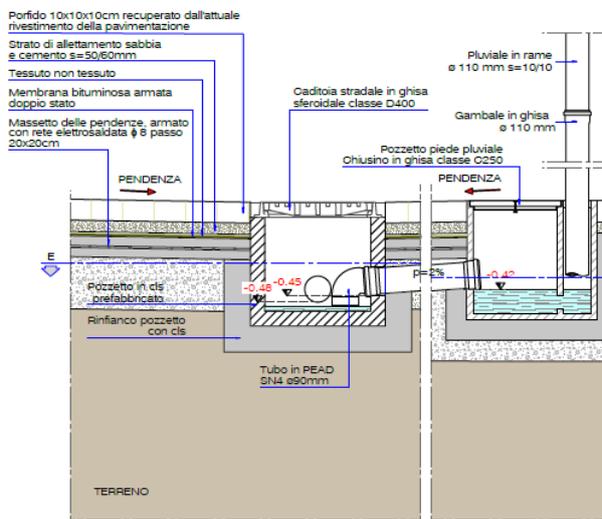


Figura 5.7: Sezione della caditoia "C2" e del pluviale "P7" (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)

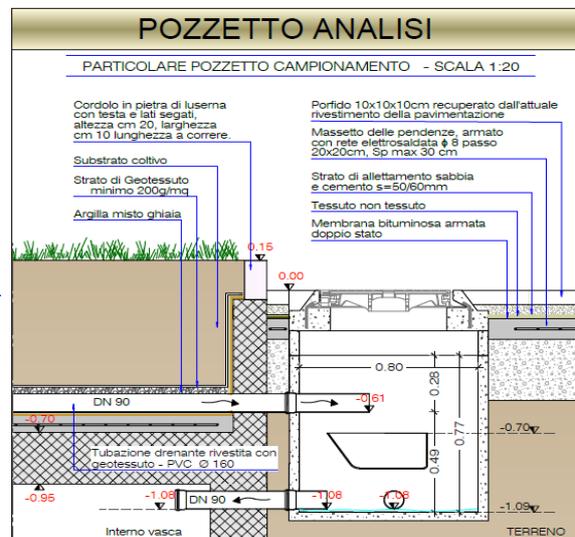


Figura 5.8: Particolare pozzetto di campionamento JPA2 (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)

SWMM i pozzetti vengono schematizzati come junction che collegano i links. I principali parametri che si definiscono per i nodi sono l'invert elevation e max depth (Rossman, 2017); nella tabella 5.6 sono riportati le caratteristiche dei nodi-pozzetto.

Tabella 5.6: Proprietà principali assegnate ai junctions.

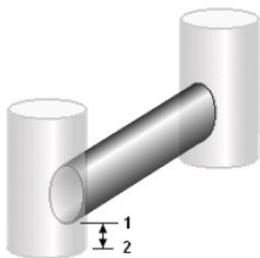
JUNCTIONS		
JunID	Inv.El. [m]	Max. Depth [m]
JP1	-0.54	0.54
JP2	-0.54	0.54
JP3	-0.54	0.54

JP4	-0.54	0.54
JP5	-0.54	0.54
JP6	-0.54	0.54
JP7	-0.54	0.54
JPC1	-1.24	1.16
JPC2	-0.54	0.52
JPC3	-0.64	0.62
JPAVA	-1.42	1.42
JPA1	-1.06	1.06
JPA2	-1.09	1.09
JPA3	-1.07	1.07
JPRC	-0.88	0.88

Il nodo di uscita del sistema di drenaggio è un pozzetto della linea bianca in calcestruzzo. I principali parametri di ingresso per un nodo di uscita sono: invert elevation, tipologia di condizioni al contorno (Rossman, 2017). Per il nodo di scarico della linea bianca della fognatura si è scelto di utilizzare la condizione FREE come boundary condition. Per tale condizione lo scarico è definito in funzione della profondità minima di flusso critico e della profondità di flusso normale nel condotto di collegamento (Rossman, 2015).

5.6 Modellazione dei collegamenti

I collegamenti che si realizzano tra i pozzetti, il canale di raccolta, le vasche di stoccaggio e la linea bianca della rete fognaria, sono delle tubazioni in polipropilene con diametro variabile. La modellazione di tali tubazioni all'interno del codice di calcolo è stata eseguita mediante l'oggetto conduit per il quale si sono specificati i seguenti parametri: definizione dei nodi di ingresso e uscita, l'altezza di offset (è definito come la distanza tra i punti 1 e 2 rappresentato nella Figura 5.9), la lunghezza del condotto, il coefficiente di Manning, la forma e la dimensione della sezione trasversale (Rossman, 2017). Le condotte di collegamento hanno forma circolare chiusa, coefficiente di Manning pari a $0.0095 \text{ s/m}^{1/3}$.



La portata all'interno delle tubazioni è definita dalle equazioni di St. Venant (trattate nel capitolo descrittivo del codice di calcolo, 3.3).

Figura 5.9: Offset di una condotta (Rossman, 2017)

5.7 Modellazione delle vasche di prima pioggia e raccolta

Le acque meteoriche in arrivo dal canale di raccolta sono convogliate mediante uno stramazzone triangolare all'interno della vasca di prima pioggia. Tale vasca è collegata (Figura 5.10) mediante un tubo troppo pieno ad una vasca di raccolta, una struttura interrata dov'è prevista la presenza di pompe trifase che alimenteranno un sistema di piogge artificiali; tale sistema simulerà eventi meteorici e consentirà di analizzare gli effetti che questi hanno sul sistema di drenaggio.

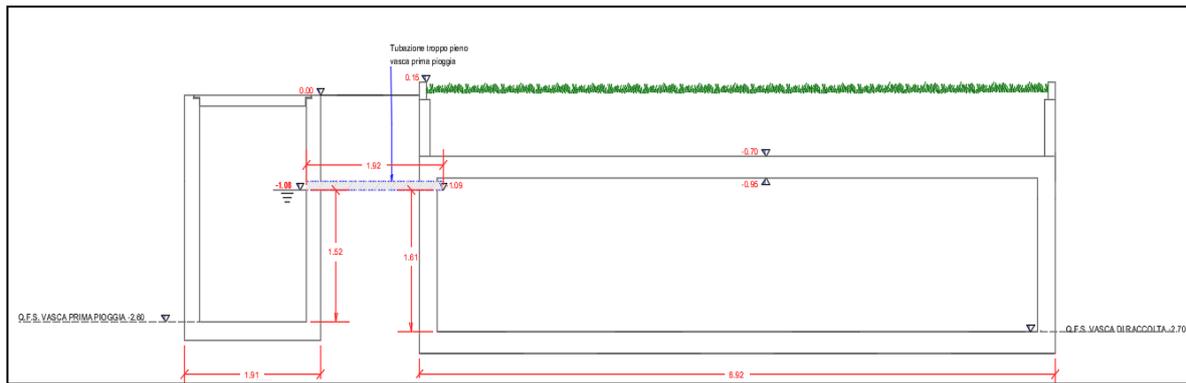


Figura 5.10: Rappresentazione trasversale delle due vasche (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)

“Le acque che caratterizzano il deflusso nel periodo iniziale del transitorio sono dette acque di prima pioggia.” (Da Deppo L., et al., 2009) Le acque di prima pioggia, secondo il Regolamento Regionale 24 marzo 2006, N. 4, *Disciplina dello smaltimento delle acque di prima pioggia e di lavaggio delle aree esterne, in attuazione dell'articolo 52, comma 1, lettera a) della legge regionale 12 dicembre 2003, n. 26*, sono definite come “quelle corrispondenti, nella prima parte di ogni evento meteorico, ad una precipitazione di 5 mm uniformemente distribuita sull'intera superficie scolante servita dalla rete di raccolta delle acque meteoriche.” (Da Deppo L., et al., 2009). Per il controllo delle acque di prima pioggia, si provvede al loro convogliamento all'interno di vasche, definite vasche di prima pioggia (Da Deppo L., et al., 2009). La vasca di prima pioggia è una struttura interrata di forma rettangolare di 5.5 m², realizzata in calcestruzzo armato e dotata di soletta di chiusura in calcestruzzo armato. La struttura ha una profondità di 2.6 m dal piano campagna.

La vasca di raccolta interrata e ricoperta dal verde pensile ha la funzione di ridurre il picco di portata nella rete fognaria. All'interno della vasca sono convogliate le portate provenienti dalla vasca di prima pioggia e dal pozzetto di raccolta delle acque provenienti dai dreni delle celle di bioritenzione. La vasca ha forma rettangolare, superficie pari a 202 m², altezza di 1.75 m e profondità di 2.7 m dal piano campagna. La struttura è dotata di setti che sorreggono la soletta in calcestruzzo armato, mentre il fondo e le pareti della vasca sono rivestite con manto impermeabile flessibile in poliolefine.

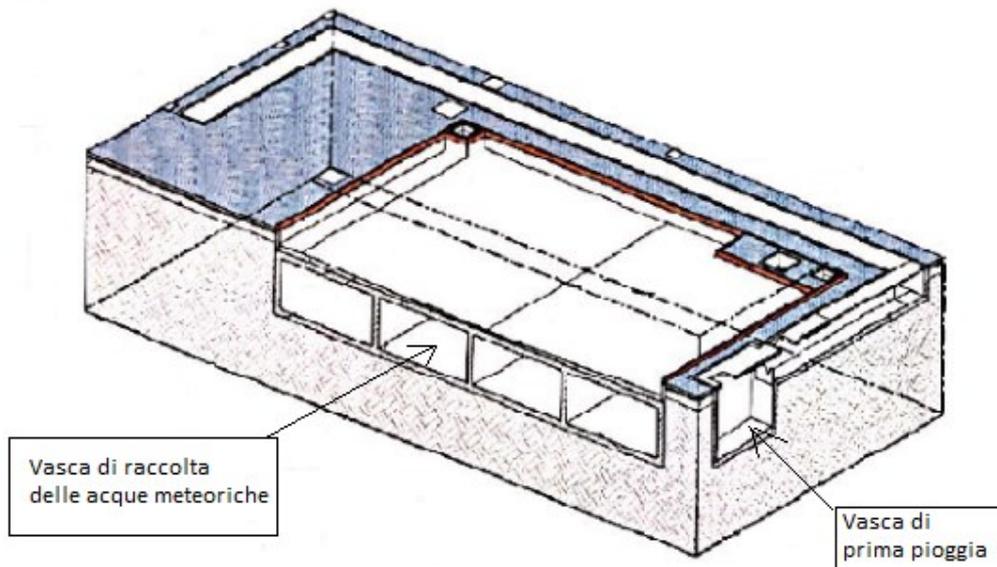


Figura 5.11: Rappresentazione 3D delle vasche (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)

Le vasche di prima pioggia e raccolta (Figura 5.11) sono state modellate mediante il comando storage, che rappresenta nodi in grado di fornire il volume di immagazzinamento. Per descrivere come la superficie dell'unità di stoccaggio varia con la profondità dell'acqua, si è utilizzata una funzione:

$$Area = A (Depth)^B + C$$

dove A il coefficiente che si è posto pari a 0, B l'esponente anch'esso pari a zero in quanto la geometria delle vasche è costante e C la costante che definisce l'area geometrica delle vasche (Rossman, 2017).

5.8 Modellazione del sistema di pompaggio

Il sistema di pompaggio consentirà di valutare il contributo di evapotraspirazione mediante la modellazione di una vasca (storage unit) virtuale con superficie pari all'area del verde pensile. Il sistema di pompaggio è caratterizzato da 12 pompe. In SWMM le pompe sono definite come collegamenti tra due nodi (nel caso in esame si tratta del collegamento della vasca di prima pioggia e della vasca virtuale), che hanno una relazione tra la portata Q e la prevalenza H. Tale relazione è definita da una curva della pompa (Rossman, 2017). La tipologia di curva scelta per il sistema di pompaggio è TYPE 2 (Figura 5.12), che definisce un funzionamento della pompa a portata costante, la quale è applicata rispetto alla profondità del nodo d'ingresso della pompa (Rossman, 2015).

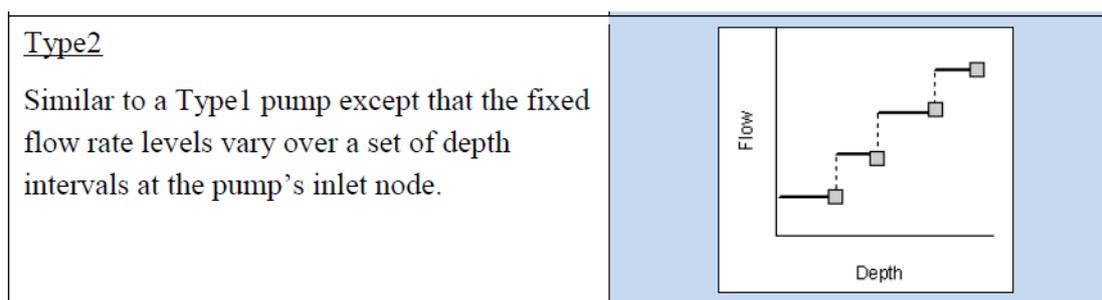


Figura 5.12: Una delle tipologie di pompaggio riconosciute da SWMM (Rossman, 2015)

Ciascuna delle 12 pompe è caratterizzata da una specifica portata, definita in funzione del contributo di evapotraspirazione potenziale mensile richiesto (Tabella 5.7).

Tabella 5.7: Andamento mensile di evapotraspirazione e portata da assegnare a ciascuna pompa

Mese	ET [mm/mese]	Q _{pompa} [l/s]
Gennaio	5.2	0.00041
Febbraio	11.7	0.00092
Marzo	36.1	0.00284
Aprile	52.4	0.00412
Maggio	96.1	0.00756
Giugno	130.0	0.01023
Luglio	152.7	0.01202
Agosto	138.9	0.01093
Settembre	82.9	0.00652
Ottobre	46.6	0.00367
Novembre	17.3	0.00136
Dicembre	6.1	0.00048

La gestione del sistema di pompaggio viene valutato attraverso il comando Controls (Figura 5.13) del codice SWMM, in particolare per ciascun mese della simulazione si è definita una specifica regola che consente la variazione della portata al variare dei mesi dell'anno.

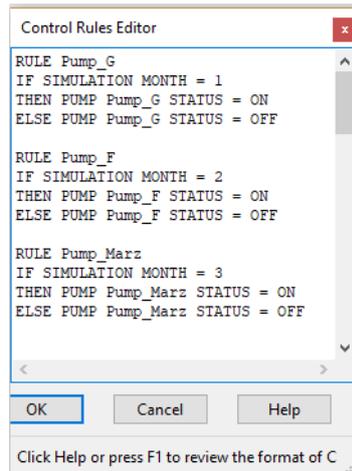


Figura 5.13: Estratto del Control per il funzionamento del sistema di pompaggio

5.9 Modellazione dello stramazzo triangolare

Le acque meteoriche dal canale di raccolta giungono nella vasca di prima pioggia mediante uno stramazzo triangolare (Figura 5.14), che è stato schematizzato in SWMM mediante il comando Weirs.

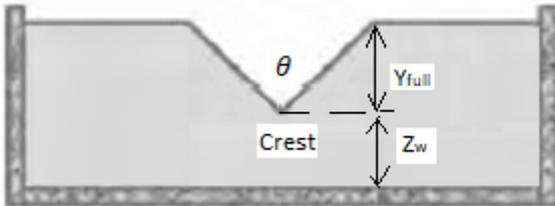


Figura 5.14: Rappresentazione dello stramazzo triangolare (Rossman, 2017)

SWMM rappresenta il Weirs come un collegamento tra due nodi, la vasca di prima pioggia e la vasca di raccolta. L'equazione generale della portata per che uno stramazzo triangolare è così definita:

$$Q = C_w \tan(\theta/2) H_e^{5/2}$$

dove Q è la portata, θ è l'angolo della fessura di uno stramazzo triangolare, H_e carico sullo stramazzo e C_w è un coefficiente di stramazzo (Citriani, et al., 1987), che è determinato dalla seguente relazione:

$$C_w = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_c = 1.42$$

5.10 Modellazione del verde pensile

Nella parte superiore della vasca di raccolta è collocato il verde pensile, un'area di bio-ritenzione che consentirà l'attenuazione dei picchi di portata che potranno verificarsi durante eventi estremi. Le precipitazioni che cadranno sul verde pensile verranno in parte captate dalla vegetazione e in parte si infiltreranno nel terreno dove un dreno le convoglierà all'interno di una vasca di raccolta.

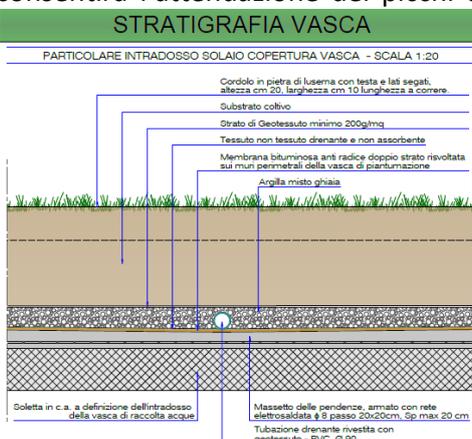


Figura 5.15: Stratigrafia della vasca di raccolta (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)

La stratigrafia della copertura della vasca di raccolta (Figura 5.15), ovvero la definizione del verde pensile, è modellata mediante la tecnologia LID delle celle di bioritenzione. L'assegnazione del LID nel modello viene eseguita mediante la definizione di 3 subcatchments, ciascuno dei quali costituito da una superficie di 68 m².

Le caratteristiche delle celle di bioritenzione per il caso studio in esame sono riportate in Figura 5.16.

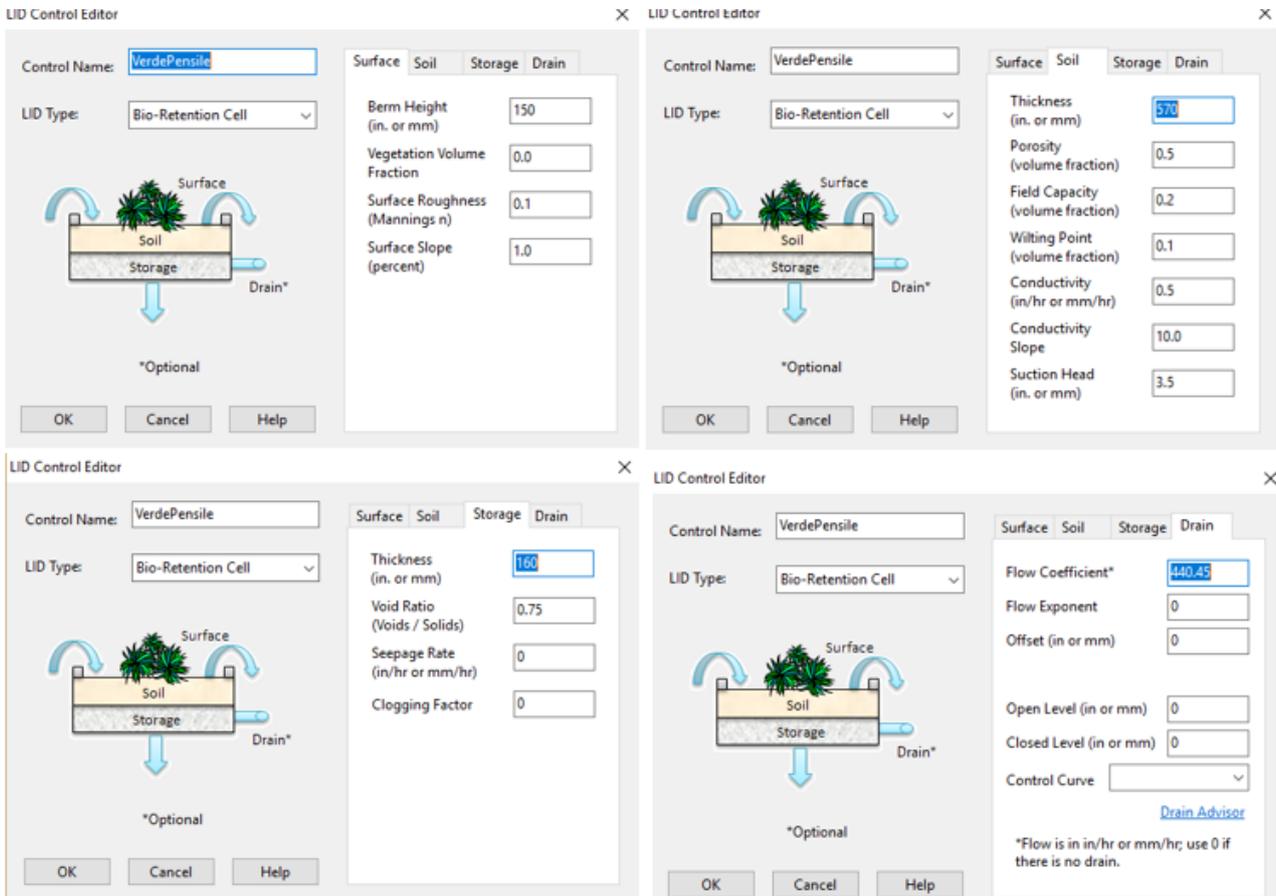


Figura 5.16: Caratteristiche che definiscono la modellazione delle celle di bioritenzione

In SWMM i LID Controls sono definiti come una combinazione di strati verticali le cui proprietà sono assegnate per unità di area. Per le celle di bioritenzione gli strati definiti sono:

- Surface Layer, è un substrato coltivo di 15 cm;
- Soil Layer, è costituito da uno strato di terreno di 57 cm;
- Storage Layer, è lo strato di 16 cm di argilla misto ghiaia;
- Drain Sistem, è il sistema di scarico che convoglia l'acqua all'esterno dello storage layer verso l'uscita attraverso una tubazione in PVC (DN 90) drenante rivestita con geotessuto. Il flow Coefficient è un parametro che viene attribuito al dreno e che è stato definito supponendo che la portata in ingresso sia limitata dalla capacità del flusso nella tubazione. Per determinare il coefficiente di drenaggio si è utilizzata l'equazione di Manning:

$$Q = (0.464 / n_{pipe}) S_{pipe}^{0.5} D_{pipe}^{2.67}$$

Dove Q è la portata, n_{pipe} è il coefficiente di Manning del tubo, S_{pipe} è la pendenza, D_{pipe} è il diametro del tubo. Il coefficiente di drenaggio è definito dalla seguente relazione:

$$C_{3D} = N_{pipe} Q / A_{LID} = 440.45 \text{ mm/h}$$

Dove N_{pipe} è il numero di dreni e A_{LID} è l'area del LID (Rossman, 2016). Per la definizione di A_{LID} si è diviso il verde pensile in 3 aree, ciascuna caratterizzata da un dreno che convogliava le acque all'interno dei pozzetti.

6 ANALISI DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Il funzionamento del sistema “Laboratorio green-court-lab” viene valutato mediante l’esecuzione di simulazioni numeriche condotte attraverso l’ausilio del codice SWMM, che riguardano i dati orari di precipitazione osservati dalla stazione pluviometrica Torino via della Consolata nell’anno 2010 e 2017 e dal pluviometro presente nella sede centrale del Politecnico per l’anno 2016. Dopo aver osservato i valori annui di precipitazione cumulata registrati a Torino, si è scelto di utilizzare i dati registrati nei seguenti anni:

- 2010, definito dal VI rapporto sul clima in Italia come l’anno in cui le precipitazioni risultavano essere più abbondanti rispetto alla media climatologica (Desiato, et al., 2011) ;
- 2016, anno in cui le precipitazioni cumulate annuali nella città di Torino sono circa pari alla media climatologica, nonostante secondo il XII rapporto del Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente in tale anno si fossero verificati eventi di forte intensità nel mese di novembre (Desiato, et al., 2017);
- 2017, considerato l’anno più secco secondo il XVII Rapporto del Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente (Desiato, et al., 2018).

I risultati delle simulazioni sono descritti dall’equazione di continuità, che definisce il funzionamento del sistema mediante il bilancio, ovvero “la comparazione, nel periodo di tempo considerato e con riferimento ad un bacino o sottobacino, tra afflussi e deflussi naturali, ovvero in assenza di pressioni antropiche” (D.M. 28 luglio 2004).

Il bilancio è stato valutato a scala mensile e annua a partire dai dati meteorologici e viene descritto analizzando i flussi in ingresso, in uscita e i volumi immagazzinati, attraverso l’equazione di continuità applicata al volume di controllo in un intervallo di tempo Δt :

$$P = D + E + I + \Delta V$$

dove P = precipitazioni totali (afflussi), D = deflusso totale, E = evapotraspirazione, I = infiltrazione, ΔV = variazione del volume immagazzinato.

Nelle tre simulazioni l’effetto dell’infiltrazione è nullo in quanto le superfici del sito in esame sono state modellate come impermeabili. Il contributo di evapotraspirazione viene valutato mediante la modellazione di una vasca (storage unit) virtuale con superficie pari all’area del verde pensile e alimentata da un sistema di 12 pompe. A ciascuna pompa è stato assegnato un valore di portata corrispondente al valore mensile di evapotraspirazione potenziale (ET) richiesta. Di seguito verranno analizzati i risultati delle tre simulazioni ed eseguiti dei confronti tra queste.

6.1 SIMULAZIONE NUMERICA PER L’ANNO UMIDO

L’anno 2010, secondo il VI rapporto sul clima in Italia, è l’anno in sono state registrate precipitazioni superiori rispetto alla media climatologica (Desiato, et al., 2011). In particolare, nella zona del torinese (Figura 6.1) sono stati rilevati dei valori di pioggia cumulati superiori al 50-60% dei valori climatologici (ARPA Piemonte). Per definire il funzionamento del sistema sottoposto ad un evento meteorico di grande portata, come lo è quello che si registra nell’anno 2010, si è scelto di utilizzare i dati pluviometrici della stazione Torino via della Consolata (Tabella 6.1), collocata nelle vicinanze del sito in esame.

Tabella 6.1: Andamento mensile delle precipitazioni cumulate, registrate dalla stazione pluviometrica Torino via della Consolata

Mese	P [mm]
Gen	38.6
Feb	57.2
Mar	50.8
Apr	39.6
Mag	176.2
Giu	261.4
Lug	24.2
Ago	230.8
Set	84.2
Ott	78.6
Nov	203.2
Dic	82.2

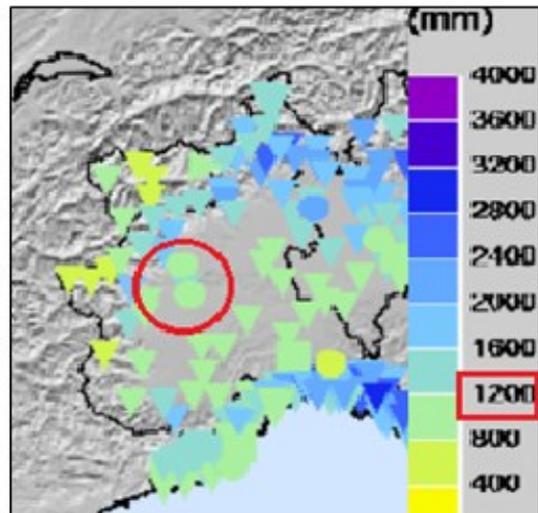


Figura 6.1: Precipitazione cumulata 2010 (Desiato, et al., 2011)

Nel 2010 a Torino e sul sito in cui sarà collocato il Laboratorio a cielo aperto, sono caduti 1327 mm di pioggia. Dalla simulazione condotta attraverso il codice SWMM si sono ottenuti un valore di evapotraspirazione teorica di 117.3 mm e una variazione di volume immagazzinato pari a 273.1 mm (comprendente il contributo di stoccaggio delle vasche di prima pioggia e raccolta, del canale di raccolta delle acque meteoriche e della tecnologia LID). Il quantitativo d'acqua che fuoriesce dal sistema e giunge in fognatura è di 937 mm. Le grandezze che costituiscono il bilancio idrologico annuo e mensile sono riassunte nelle tabelle 6.2 e 6.3.

Tabella 6.2: Definizione del bilancio idrologico annuo per la simulazione dell'anno umido

Anno	P		E		$\Delta V_{vasca\ PP}$		$\Delta V_{vasca\ R}$		ΔV_{canale}		V_{Outlet}		ΔV_{LID}	
	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³
2010	1327.0	1615.0	117.3	142.8	6.9	8.4	255.9	311.4	0.2	0.3	937.3	1140.7	10.10	12.30

Tabella 6.3: Definizione del bilancio idrologico mensile per la simulazione dell'anno umido

Mese	Anno	P		E		$\Delta V_{vasca\ PP}$		$\Delta V_{vasca\ R}$		ΔV_{canale}		$V_{outfalls}$		ΔV_{LID}	
		mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³
1	2010	38.6	47.0	0.7	0.8	6.8	8.3	22.1	26.9	0.1	0.1	0.0	0.0	2.2	2.6
2	2010	58.6	71.3	1.8	2.2	0.1	0.1	47.5	57.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	3.3
3	2010	49.4	60.1	6.2	7.6	-0.1	-0.1	40.8	49.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.0
4	2010	43.4	52.8	8.8	10.7	0.1	0.1	33.1	40.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.5
5	2010	172.4	209.8	16.6	20.2	-1.3	-1.6	111.8	136.0	0.0	-0.1	40.2	48.9	2.1	2.6
6	2010	261.4	318.1	21.8	26.5	0.7	0.9	0.2	0.3	0.0	0.0	239.3	291.2	3.8	4.6
7	2010	24.2	29.5	23.8	29.0	-6.3	-7.7	-0.3	-0.3	0.0	0.0	22.0	26.8	-5.0	-6.1
8	2010	230.8	280.9	22.0	26.8	0.8	1.0	0.2	0.2	0.0	0.0	212.5	258.6	3.4	4.1
9	2010	84.2	102.5	11.9	14.5	3.5	4.3	-0.1	-0.1	0.0	0.0	80.6	98.1	-1.8	-2.2
10	2010	109.8	133.6	3.7	4.4	2.6	3.2	2.0	2.4	0.4	0.5	89.3	108.7	1.5	1.9
11	2010	177.2	215.7	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.8	-0.9	-0.3	-0.4	178.8	217.6	-0.3	-0.4
12	2010	77.0	93.7	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	-0.8	0.0	0.0	74.6	90.8	0.3	0.3

Dalla tabella 6.2 si evince che il mese di agosto è quello in cui si registra un valore di precipitazione massima di 230.8 mm e che il 92 % di questa giunge direttamente nel sistema di collettamento, mentre il quantitativo d'acqua caduto durante il mese di marzo viene immagazzinato all'interno delle vasche del sistema.

Nelle Figure 6.2 e 6.3 sono riportati gli andamenti delle portate d'ingresso e i volumi all'interno della vasca fittizia che consentono di individuare il quantitativo di evapotraspirazione. Dal sistema di pompaggio alloggiato all'interno della vasca di prima pioggia si riesce a soddisfare solo il 90% di evapotraspirazione richiesta.

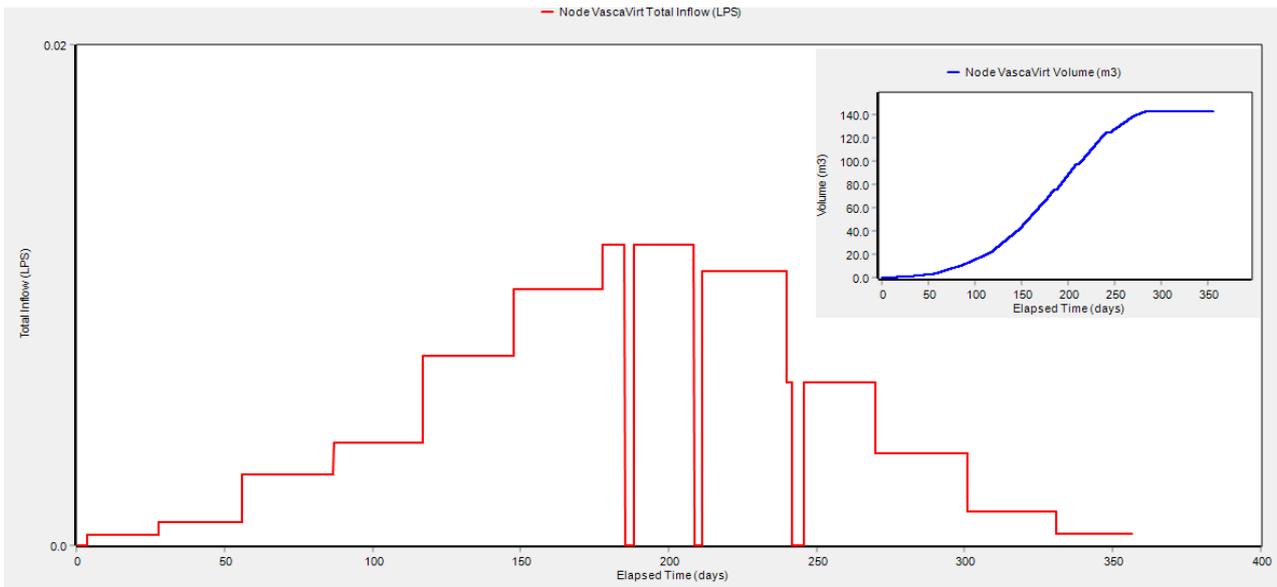


Figura 6.2 Andamento delle portate in ingresso e dei volumi all'interno della vasca fittizia

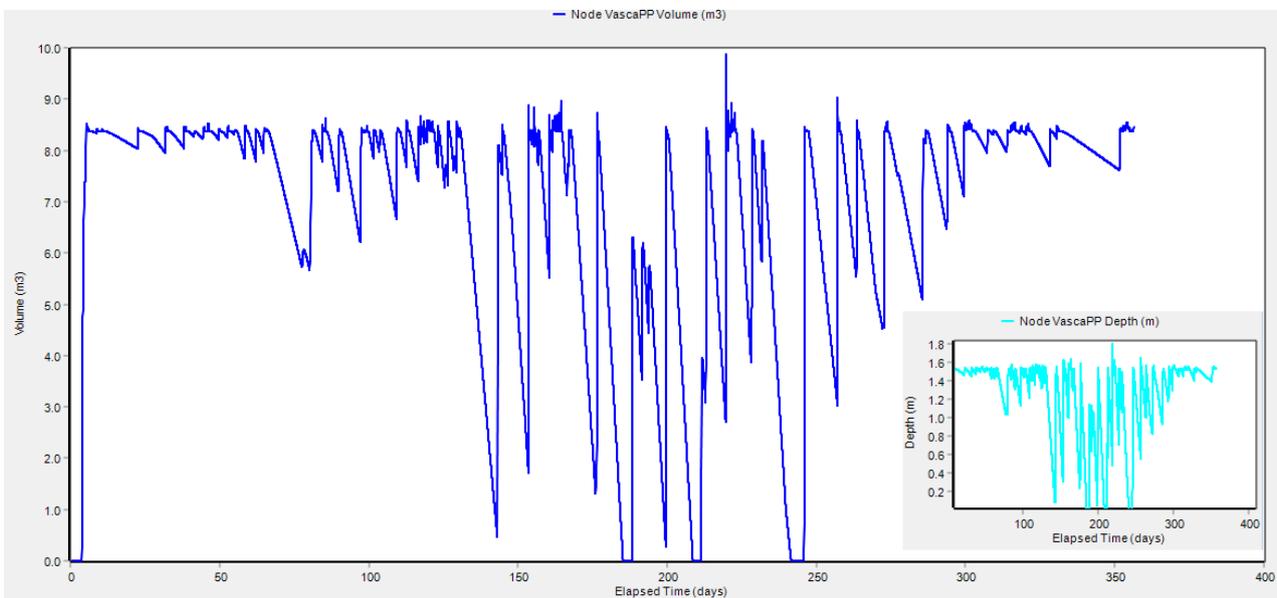


Figura 6.3 Andamento dei volumi e delle profondità d'acqua all'interno della vasca di prima pioggia

Nella figura 6.3 il grafico mette in evidenza un andamento crescente nei primi giorni di gennaio dove vengono raggiunti 8.5 m³ e successivamente si verifica una riduzione del volume in vasca a causa del prelievo d'acqua dal sistema di pompaggio, con valori nulli nei giorni estivi, in particolare nei mesi di luglio, agosto e nei primi giorni di settembre.

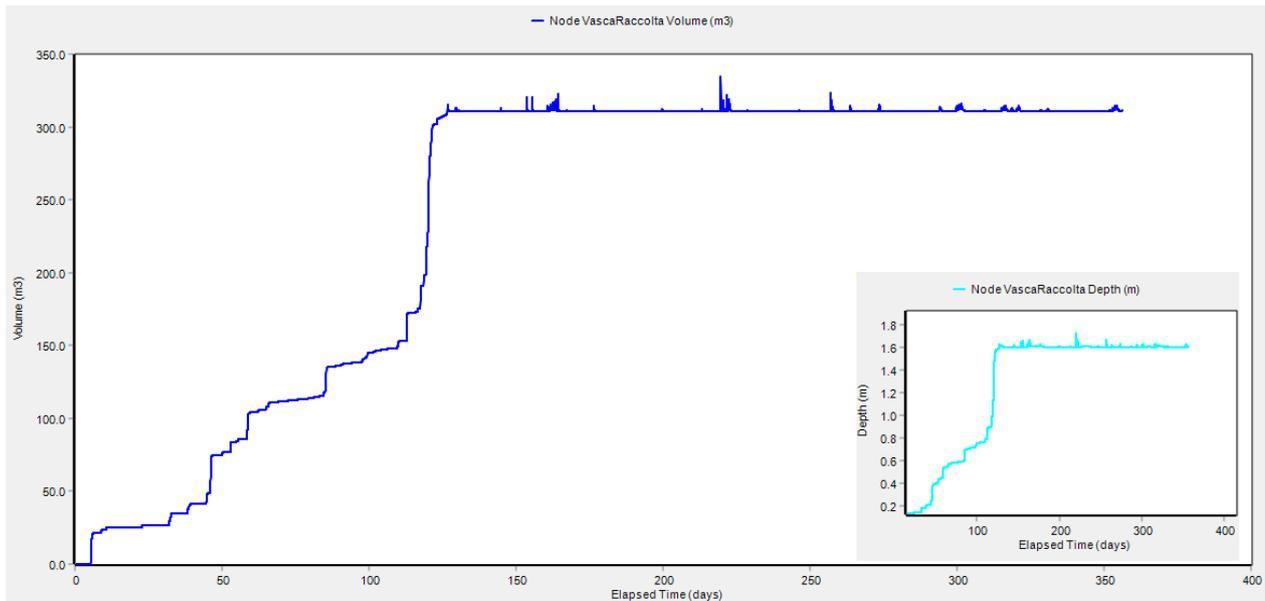


Figura 6.4 Andamento dei volumi d'acqua all'interno della vasca di raccolta

Nel 2010 si verifica il riempimento della vasca di raccolta nel giorno 11/08/2010, dove si registrano 92.74 mm di pioggia e un volume d'acqua all'interno della vasca di 334 m³. Tale giorno può essere definito come quello più piovoso nell'anno 2010 e dalla Figura 6.5 si può osservare il quantitativo d'acqua (profondità) all'interno del canale di raccolta che nell'ultimo tratto raggiunge i 35 cm .

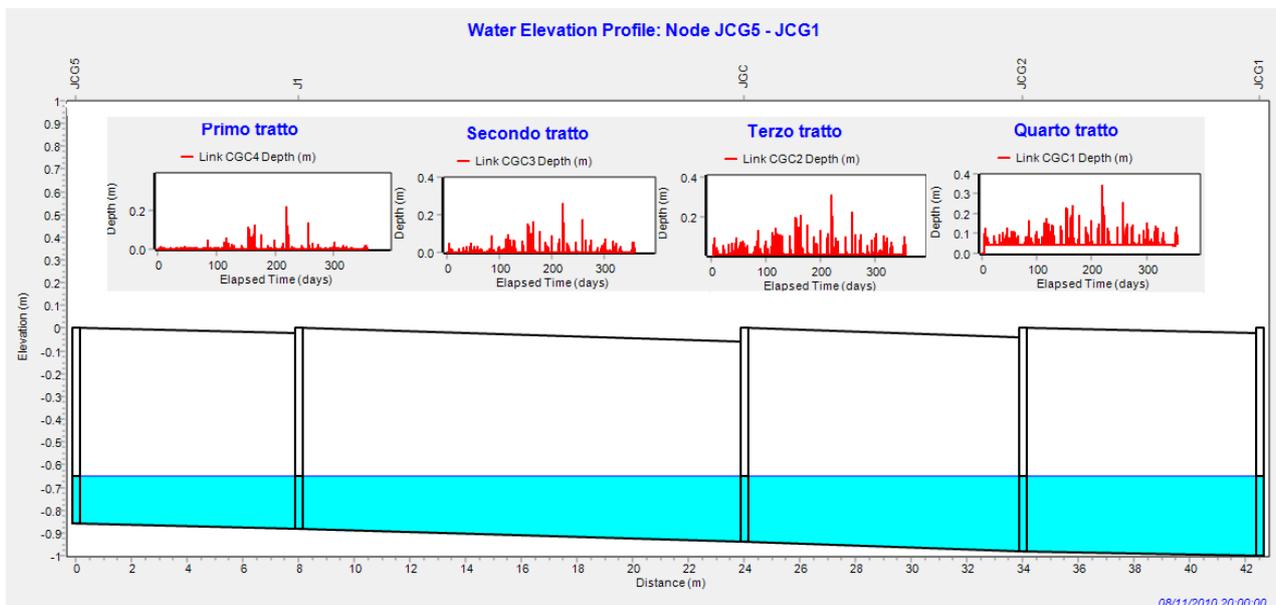


Figura 6.5 Sezione trasversale del canale nel giorno 11/08/2010 e andamenti delle profondità d'acqua nel canale

Le portate all'interno del canale di raccolta, nel giorno di massima pioggia, assumono valori di circa 6 l/s nel primo tratto del canale, 9 l/s nel secondo, 10.5 l/s nel terzo e 15 l/s nel quarto tratto.

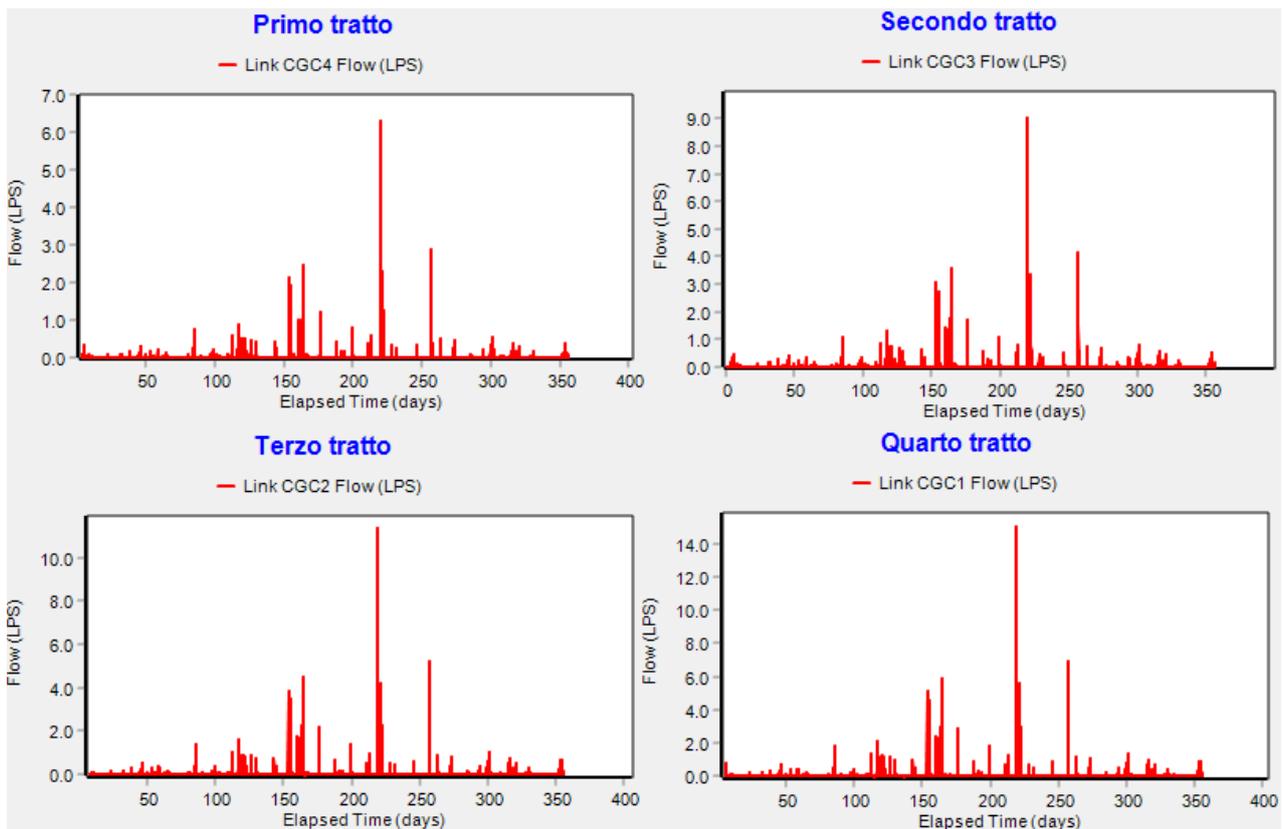


Figura 6.6 Andamento delle portate all'interno del canale di raccolta delle acque meteoriche

Gli eventi meteorici di entità pari a quelli che si verificano nel 2010, secondo quanto ottenuto dalla simulazione, non consentono di registrare la presenza di allagamenti dei pozzetti ed in particolare per il pozzetto ai piedi del pluviale P4 si definisce un valore di 32.7 cm, che rappresenta il valore minimo del livello residuo definito rispetto a tutti i pozzetti presenti nel modello.

Nel 2010 il 71 % della precipitazione giunge direttamente nel sistema fognario e per il giorno più piovoso si hanno portate (Figura 6.7) di 19 l/s che vengono scaricate nel sistema di collettamento.

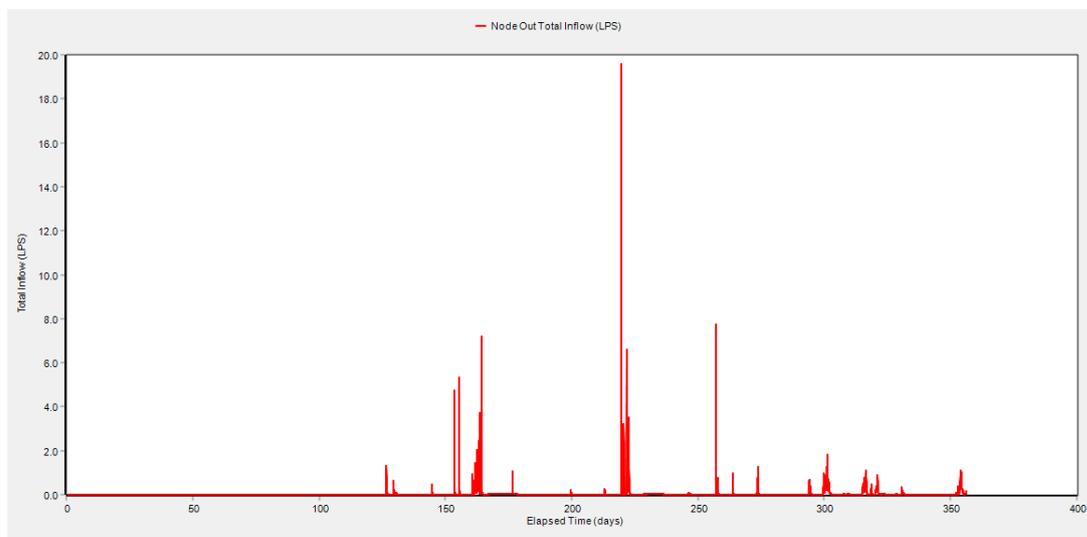


Figura 6.7 Andamento delle portate per lo scarico d'uscita del sistema

6.2 SIMULAZIONE NUMERICA PER L'ANNO SECCO

Il funzionamento del sistema, sottoposto ad un evento meteorico di bassa portata, è stato valutato considerando i dati osservati nel 2017, che è stato definito come il 3° anno più caldo e il 4° più secco degli ultimi 60 anni (Sistemi Previsionali - Arpa Piemonte). La stazione pluviometrica Torino via della Consolata per l'anno 2017 ha registrato un valore di precipitazione cumulata annua pari a 492.10 mm, nella tabella 5.4 vengono riportati i valori di precipitazione cumulata mensile.

Tabella 6.4: Andamento mensile delle precipitazioni cumulate, registrate dalla stazione pluviometrica Torino via della Consolata

Mese	2017
Gen	2.6
Feb	33.4
Mar	58.4
Apr	42
Mag	66.6
Giu	127
Lug	40.8
Ago	34.6
Set	25.2
Ott	0
Nov	37.6
Dic	24

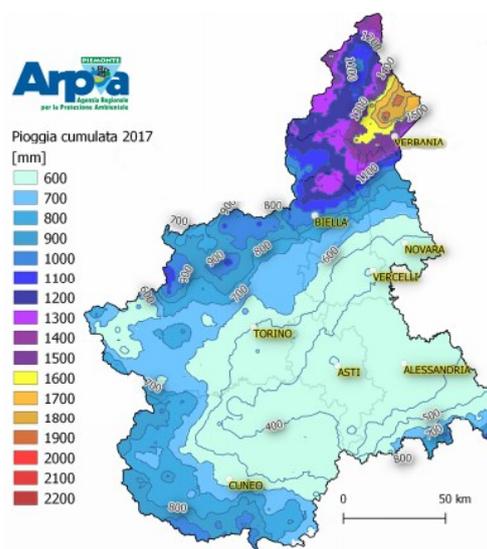


Figura 6.8: Precipitazione cumulata 2017 (Sistemi Previsionali - Arpa Piemonte)

Analogamente a quanto definito per la simulazione per l'anno umido, i valori delle grandezze del bilancio idrologico sono riportati nelle tabelle 6.5 e 6.6, che individuano i valori annui e mensili di precipitazione, evapotraspirazione, variazione dei volumi immagazzinati nelle vasche nel canale e nel LID, oltre ai valori dei volumi scaricati dal sistema annui e mensili del bilancio idrologico del sistema.

Tabella 6.5: Definizione del bilancio idrologico annuo per la simulazione dell'anno secco

Anno	P		E		V _{vasca PP}		V _{vasca R}		V _{canale}		V _{outfalls}		V _{LID}	
	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³
2017	492.2	599.0	103.2	125.6	6.92	8.4	256.4	312.0	0.00	0.00	112.7	137.1	4.2	5.1

Tabella 6.6: Definizione del bilancio idrologico mensile per la simulazione dell'anno secco

Mese	Anno	P		E		$\Delta V_{vasca PP}$		$\Delta V_{vasca R}$		ΔV_{canale}		V _{outfalls}		ΔV_{LID}	
		mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³
1	2017	2.6	3.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2
2	2017	33.4	40.6	1.8	2.2	5.9	7.2	19.6	23.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	2.3
3	2017	58.4	71.1	6.2	7.6	0.0	0.0	43.5	53.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	3.4
4	2017	42.0	51.1	8.8	10.7	0.3	0.3	31.5	38.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6
5	2017	66.6	81.1	15.7	19.1	-6.3	-7.7	55.6	67.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6
6	2017	127.0	154.6	13.0	15.8	5.8	7.1	95.5	116.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	5.2
7	2017	40.8	49.7	22.9	27.9	-1.2	-1.4	9.6	11.7	0.0	0.0	17.1	20.9	-2.8	-3.5
8	2017	35.6	43.3	15.4	18.7	-4.2	-5.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	31.9	38.8	-1.3	-1.6
9	2017	24.2	29.5	13.9	16.9	1.5	1.8	0.0	0.0	-0.1	-0.1	11.9	14.5	-0.9	-1.1
10	2017	0.0	0.0	1.9	2.3	-1.9	-2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	5.4	-1.5	-1.8
11	2017	37.6	45.8	2.5	3.0	5.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0	34.1	0.6	0.7

12	2017	24.0	29.2	0.9	1.1	2.0	2.4	1.2	1.5	-0.1	-0.1	19.4	23.6	0.0	0.0
----	------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	-----	-----

Dalla simulazione si evince che il 23% della precipitazione caduta giunge direttamente nel sistema fognario, mentre invece il 54% viene immagazzinato dai sistemi di stoccaggio rappresentati dalle vasche di prima pioggia e di raccolta. L'evapotraspirazione teorica, garantita dal sistema di pompaggio (Figura 6.9) presente nella vasca di raccolta, è in grado di soddisfare l'82 % di evapotraspirazione potenziale richiesta.

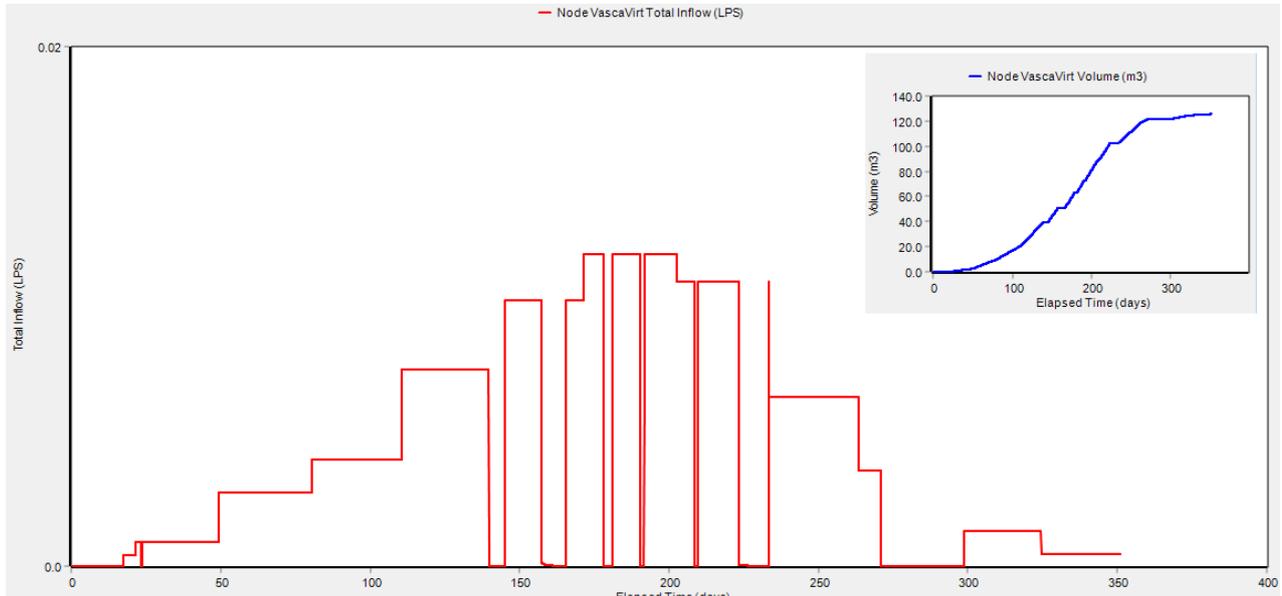


Figura 6.9 Andamento delle portate e dei volumi all'interno della vasca fittizia

Nella vasca di prima pioggia l'andamento dei volumi (Figura 6.10) è condizionato dal sistema di pompaggio che prevede prelievi maggiori durante il periodo estivo in quanto la richiesta di evapotraspirazione in tali mesi risulta essere maggiore. Il riempimento massimo della vasca si verifica il 27/06/2017, giorno in cui si registra il valore massimo annuo di precipitazione cumulata (43.80 mm), e si raggiunge una profondità d'acqua pari a 1.67 m.

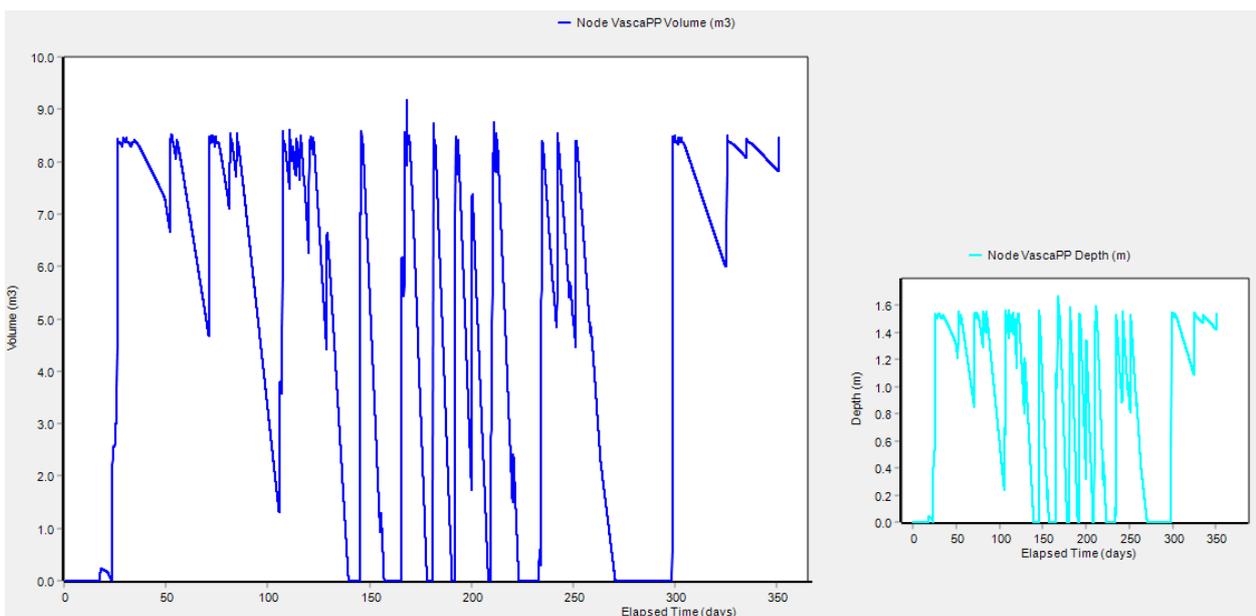


Figura 6.10 Andamento dei volumi d'acqua all'interno della vasca di prima pioggia

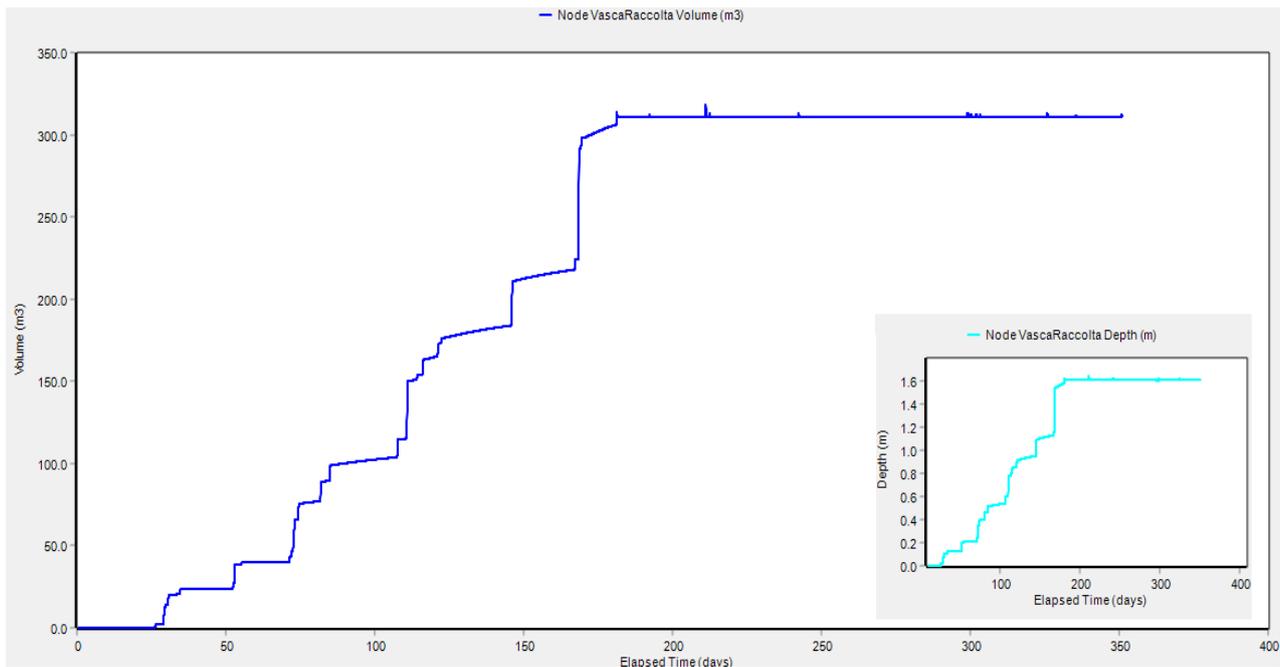


Figura 6.11 Andamento dei volumi d'acqua all'interno della vasca di raccolta

Nel 2017 la profondità massima raggiunta nella vasca di raccolta è di 1.64 mm, risultando essere quasi totalmente piena essendo questa caratterizzata da un'altezza geometrica di 1.75m.

Come definito in precedenza, il 27/06/2017 è il giorno più piovoso dell'anno la profondità dell'acqua all'interno del canale di raccolta (Figura 6.12) raggiunge i 28 cm.

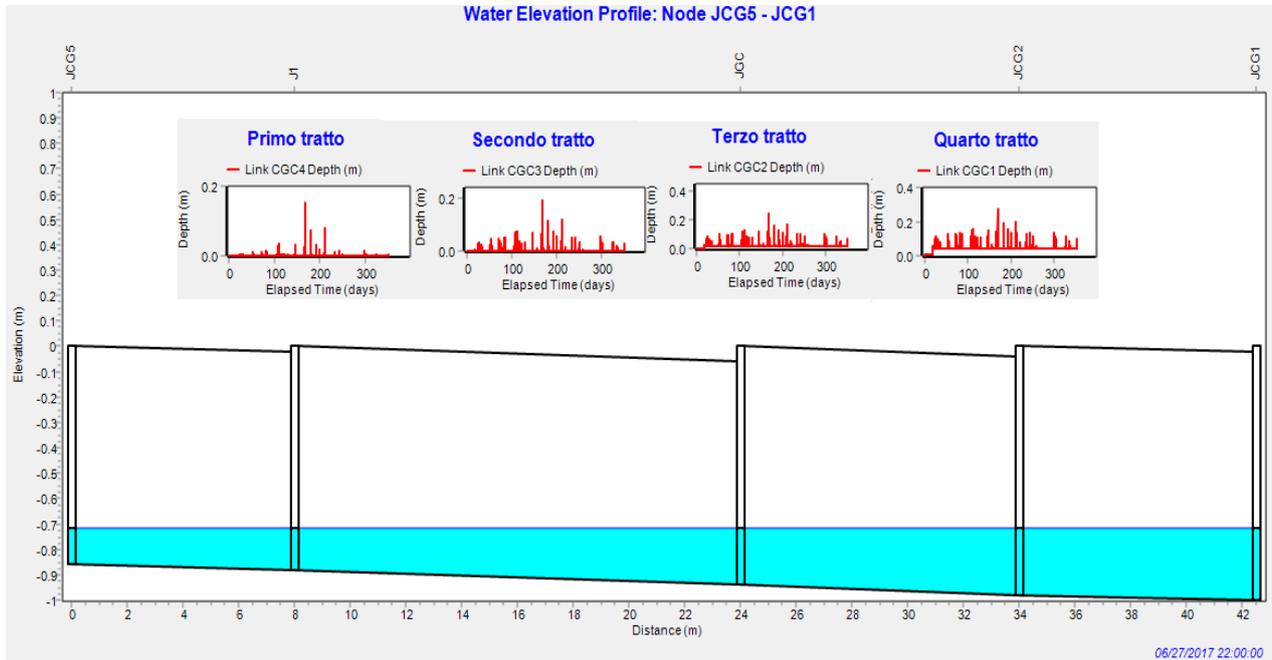


Figura 6.12 Sezione trasversale del canale di raccolta nel giorno 27/06/2017 e andamento delle profondità d'acqua nel canale

Le portate all'interno del canale presentano dei picchi nel giorno più piovoso; sono stati registrati valori di 3.5 l/s nel primo tratto del canale, 5 l/s nel secondo tratto del canale, 6.7 l/s nel terzo e 8.2 l/s nel quarto tratto. Il valore medio annuo di portata definito all'interno del canale è di 0.03 m³/s.

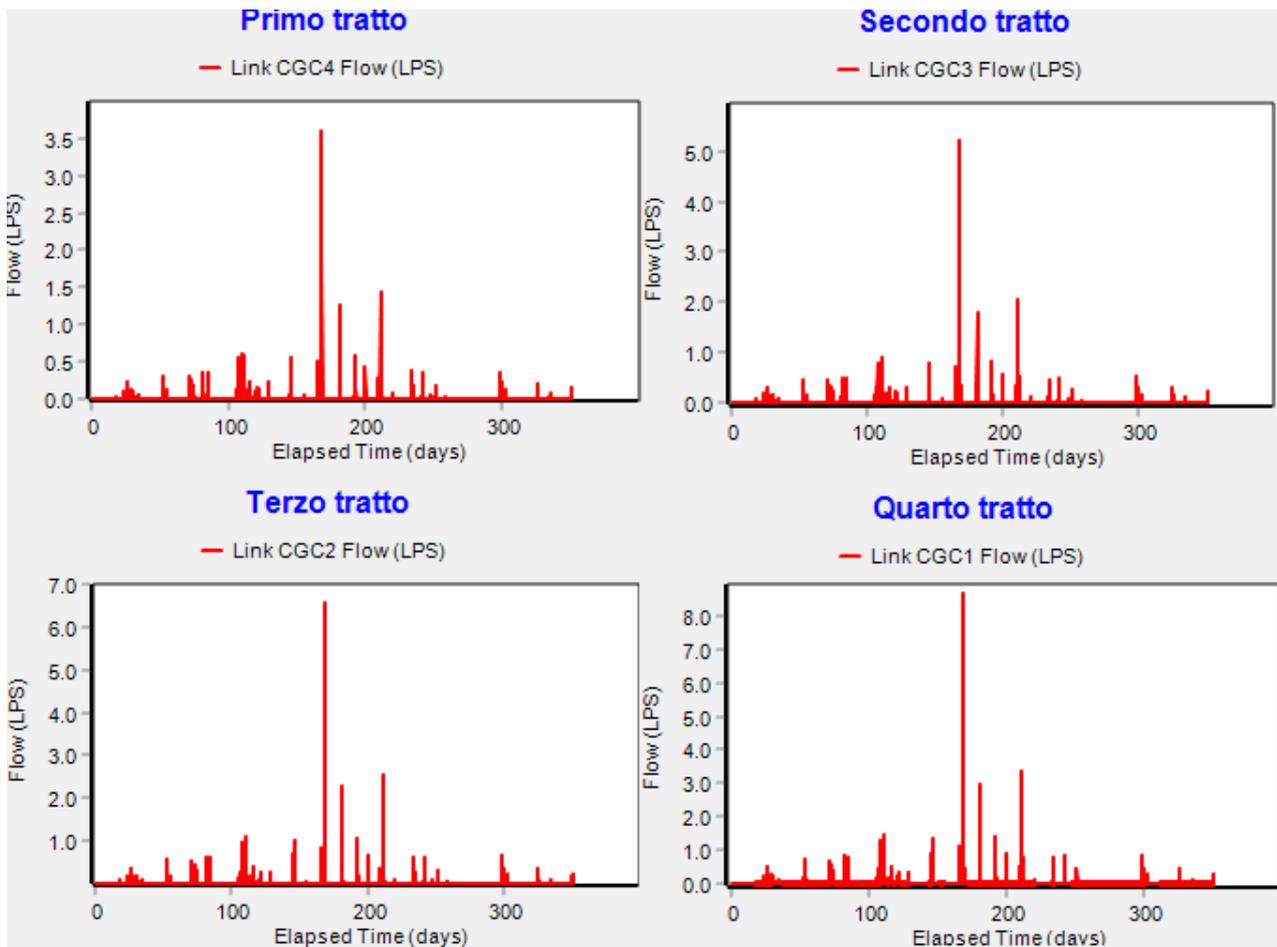


Figura 6.13 Andamento delle portate all'interno del canale di raccolta delle acque meteoriche

Dalla simulazione si osservano l'assenza di Node Flooding, ovvero non si verificano allagamenti nei nodi ed inoltre il pozzetto ai piedi del pluviale P4, posto in prossimità del canale, registra il valore minimo del livello residuo d'acqua pari a 33 cm.

Nel 4° anno più secco degli ultimi 60 anni si ha che il 23% della precipitazione caduta sul sistema viene direttamente convogliata all'interno del sistema fognario. La figura 6.14 mostra l'andamento delle portate che vengono immesse nella rete fognaria ed è possibile osservare un valore massimo di circa 3 l/s e valori nulli nella maggior parte dell'anno.

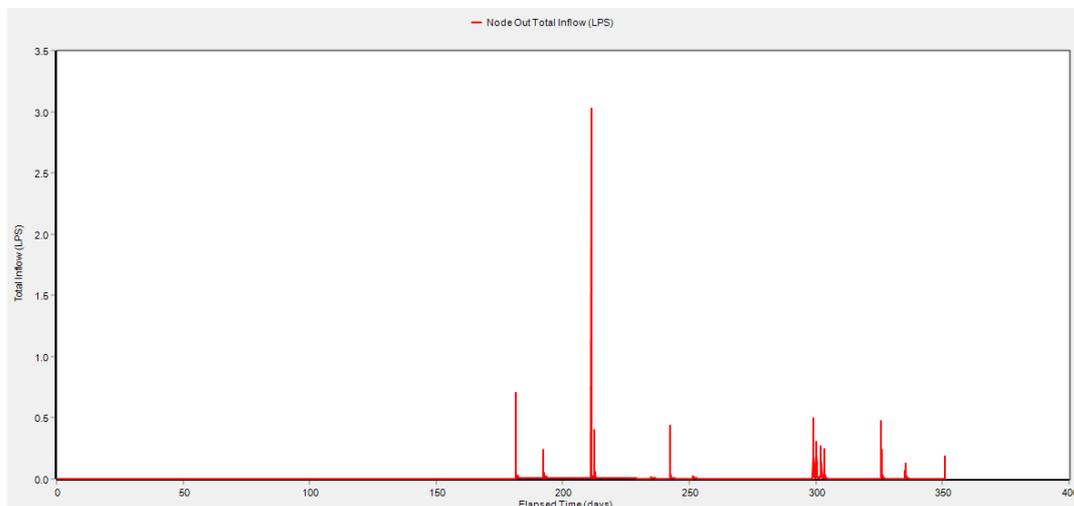


Figura 6.14 Andamento delle portate per lo scarico d'uscita del sistema

6.3 SIMULAZIONE NUMERICA PER L'ANNO DI PRECIPITAZIONE MEDIA REGISTRATA A TORINO

Nell'anno 2016 il valore di precipitazione cumulata annuo registrato a Torino, stazione pluviometrica del Politecnico, è circa pari a 910.30 mm. "Complessivamente, l'analisi dei deflussi superficiali ha evidenziato valori medi annui delle portate di poco inferiori ai valori medi storici. Alla chiusura del bacino del Po piemontese, la portata media annua è risultata di poco inferiore al valore medio degli ultimi 18 anni" è quanto viene dichiarato nel rapporto L'Idrologia in Piemonte; per tale motivo si è scelto di utilizzare i dati registrati nel 2016 (Tabella 6.7) per simulare il funzionamento del Laboratorio a cielo aperto sottoposto ad eventi meteorici di portata simile a tale anno.

Tabella 6.7: Andamento mensile delle precipitazioni cumulate, registrate dalla stazione pluviometrica del Politecnico

Mese	2016
Gen	8.2
Feb	126.6
Mar	66.6
Apr	43.6
Mag	157.8
Giu	101.1
Lug	29.4
Ago	59.2
Set	19
Ott	48.6
Nov	188.2
Dic	62

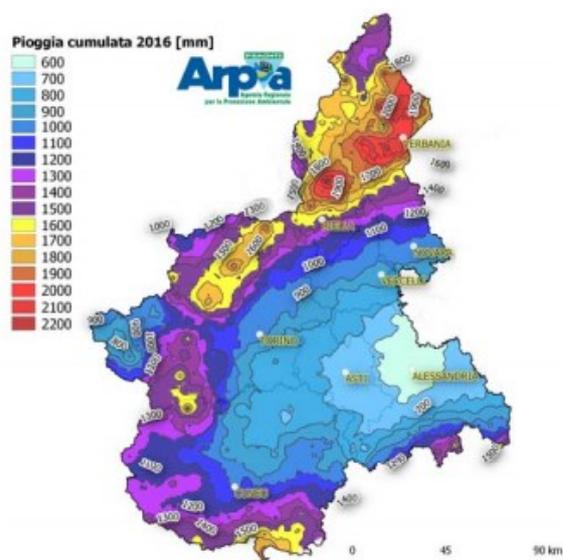


Figura 6.15: Precipitazione cumulata 2016 (Sistemi Previsionali - ARPA Piemonte)

I risultati della simulazione per l'anno medio, analogamente a quanto visto per le precedenti simulazioni, sono riportati mediante la definizione dei valori che caratterizzano il bilancio idrologico annuo e mensile (Tabelle 6.8 e 6.9).

Tabella 6.8: Definizione del bilancio idrologico annuo per la simulazione dell'anno medio

Anno	P		E		V _{vasca PP}		V _{vasca R}		V _{canale}		V _{outfalls}		ΔV _{LID}	
	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³
2016	910.3	1107.8	106.7	129.8	6.9	8.4	256.5	312.1	0.2	0.2	524.3	638.0	11.0	13.4

Tabella 6.9: Definizione del bilancio idrologico mensile per la simulazione dell'anno medio

Mese	Anno	P		E		V _{vasca PP}		V _{vasca R}		V _{canale}		V _{outfalls}		ΔV _{LID}	
		mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³	mm	m ³
1	2016	8.2	10.0	0.8	1.0	3.5	4.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.5	0.6
2	2016	126.6	154.1	1.9	2.3	3.4	4.1	99.8	121.5	0.0	0.1	0.0	0.0	7.0	8.6
3	2016	66.6	81.1	6.2	7.6	-1.9	-2.3	62.6	76.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.3	-0.4
4	2016	43.6	53.1	8.8	10.7	1.9	2.3	33.2	40.4	0.3	0.3	0.0	0.0	-0.7	-0.9
5	2016	157.8	192.0	16.6	20.2	0.0	0.0	60.3	73.3	-0.2	-0.3	77.3	94.0	2.4	3.0
6	2016	101.1	123.0	21.8	26.5	-2.0	-2.4	-0.5	-0.6	0.0	0.0	90.3	109.9	-0.5	-0.6
7	2016	29.4	35.8	16.4	19.9	1.4	1.8	-0.1	-0.1	0.1	0.1	16.8	20.5	-1.8	-2.1
8	2016	59.2	72.0	9.5	11.5	0.3	0.4	0.1	0.1	0.0	-0.1	57.3	69.8	1.1	1.3
9	2016	19.0	23.1	13.9	16.9	-5.0	-6.1	-0.1	-0.2	0.0	0.0	16.3	19.8	-1.9	-2.3

10	2016	48.6	59.1	7.1	8.7	3.1	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	38.6	47.0	0.1	0.1
11	2016	188.2	229.0	2.9	3.5	1.9	2.3	0.2	0.3	0.0	0.0	161.6	196.7	7.3	8.9
12	2016	62.0	75.5	0.7	0.9	0.1	0.2	1.0	1.2	0.1	0.1	66.0	80.4	-2.2	-2.6

Nel 2016 la percentuale di precipitazione che giunge in fognatura è del 58%, mentre la restante parte viene invasata all'interno delle vasche presenti nel sistema.

Dall'andamento dei volumi (Figura 6.16) che si registrano all'interno della vasca fittizia, è possibile definire un valore annuo di evapotraspirazione pari a 130 m³; tale valore mette in evidenza come il sistema di pompaggio è in grado di fornire il 79 % rispetto al valore di evapotraspirazione richiesto dal sistema.

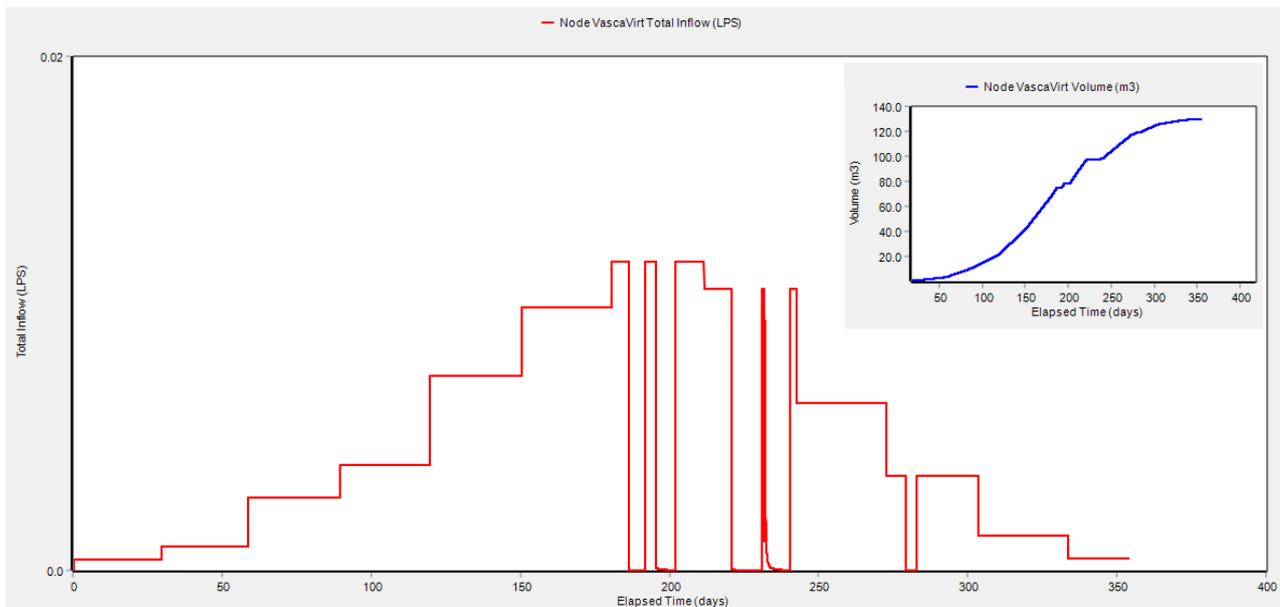


Figura 6.16 Andamento delle portate in ingresso per la vasca fittizia

Nel 2016 i volumi (Figura 6.17) all'interno della vasca di prima pioggia raggiungono valori massimi di 9 m³ e l'alimentazione del sistema di pompaggio provoca un andamento variabile della profondità d'acqua con valore minimo nullo e massima profondità raggiunta nella vasca pari a 1.62 m.

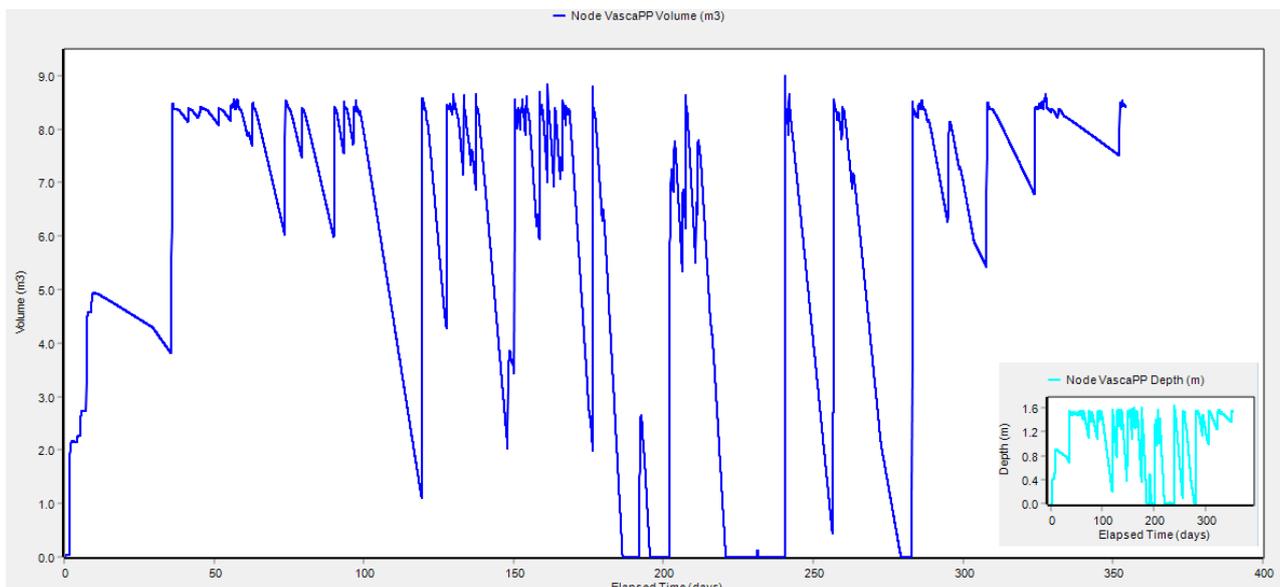


Figura 6.17 Andamento dei volumi d'acqua all'interno della vasca di prima pioggia

L'andamento dei volumi all'interno della vasca di raccolta è di poco superiore ai 322 m³ e la profondità dell'acqua è di 15 cm inferiore rispetto alla profondità geometrica della vasca.

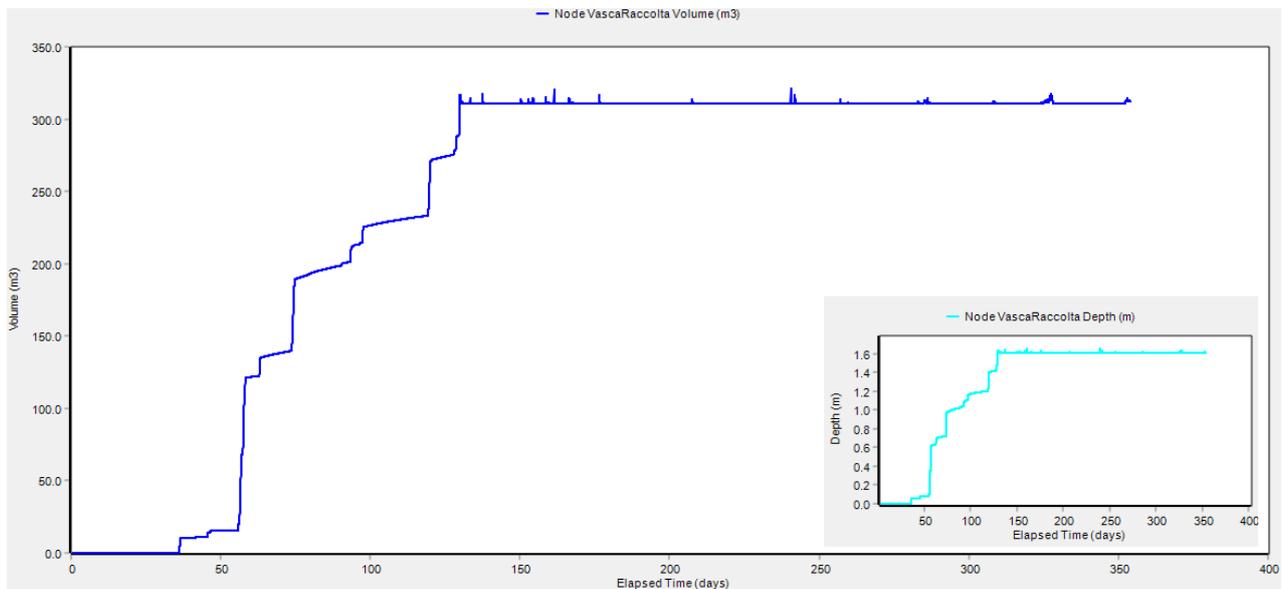


Figura 6.18 Andamento dei volumi d'acqua all'interno della vasca di raccolta

La simulazione mette in evidenza l'assenza di punti in cui si verificano allagamenti e si individua nel pozzetto ai piedi del pluviale (P4) il valore minimo del livello residuo d'acqua pari a 33.15 cm.

L'andamento delle portate all'interno del canale nel giorno 29/08/2016, in cui si registrano dei valori di precipitazione cumulata pari a 39.4 mm, assume valori massimi pari a 2.55 l/s per il primo tratto, 3.9 l/s per il secondo, 5 l/s nel terzo e 6.2 l/s per il quarto tratto del canale.

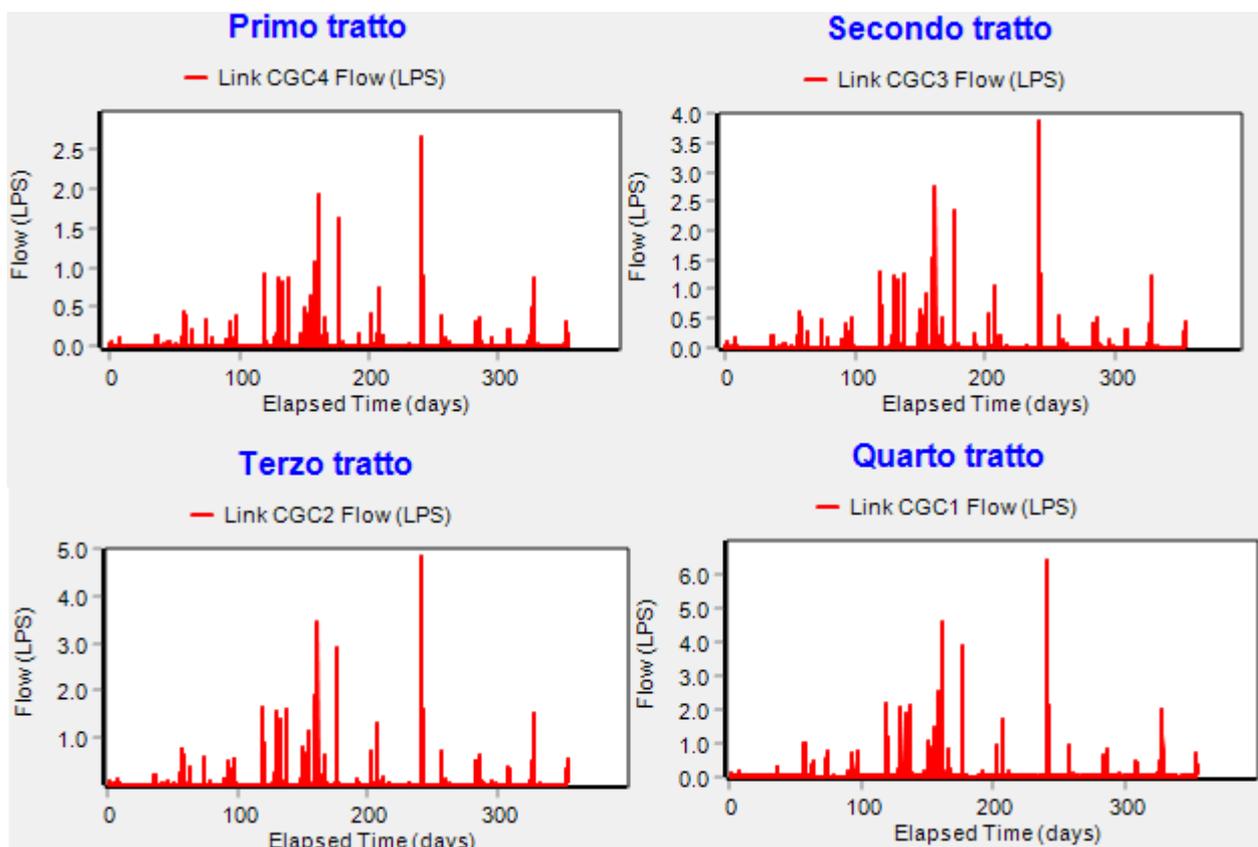


Figura 6.19 Andamento delle portate all'interno del canale di raccolta

Il 29/08/2016, quando vengono registrati dal pluviometro del Politecnico valori massimi di precipitazione cumulata oraria, è il giorno in cui nel canale sono presenti circa 25 cm d'acqua.

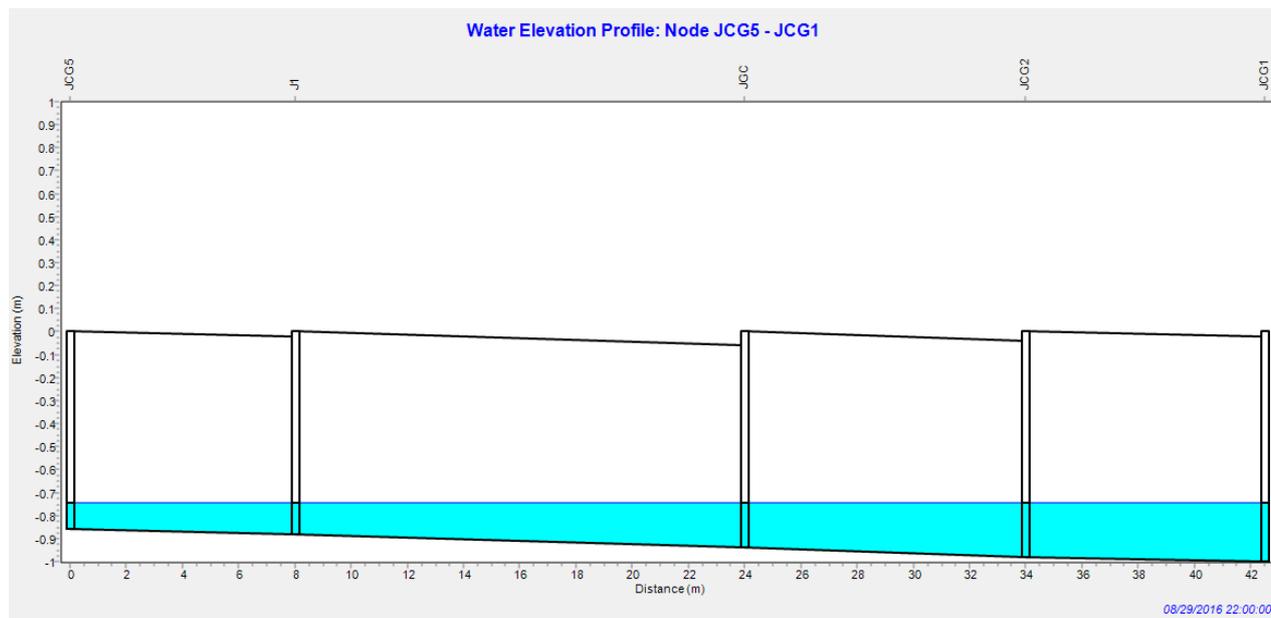


Figura 6.20 Sezione trasversale del canale di raccolta con andamento delle profondità d'acqua nel giorno 29/08/2016

Nel 2016 l'andamento delle portate in uscita dal sistema è caratterizzato da due picchi: il primo registrato l'11/06/2016 con un valore di 5 l/s, il secondo registrato il 29/08/2016 con un valore di portata pari a 6 l/s.

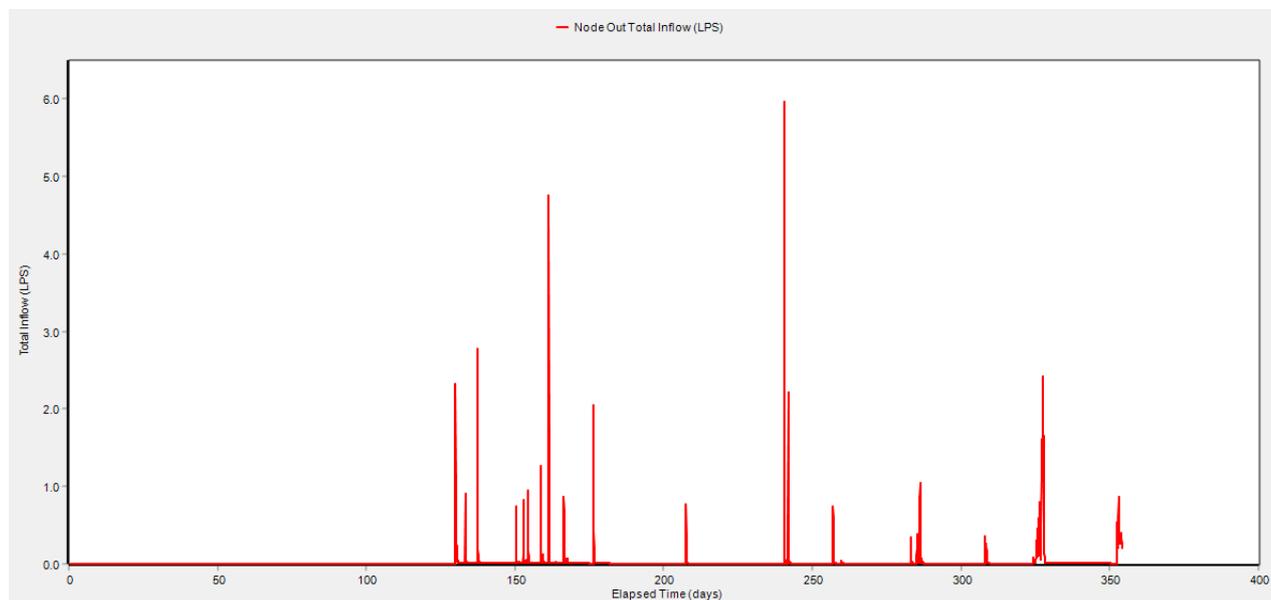


Figura 6.21 Andamento delle portate per lo scarico d'uscita dal sistema

6.4 CONFRONTO DELLE SIMULAZIONI

Le tre simulazioni condotte mediante il codice SWMM consentono di definire il funzionamento del sistema per tre diverse situazioni: evento meteorico di grande portata, piccola portata e media portata a cui può essere sottoposto il Laboratorio a cielo aperto.

Confrontando i risultati delle tre simulazioni (tabella 6.10), dove i risultati vengono espressi mediante le grandezze che caratterizzano il bilancio idrologico, è possibile notare che la percentuale di volume sfiorato dallo scarico del sistema è del 70% nel 2010, è del 22% nel 2017 e del 58% nel 2016 (Figura 6.22).

Tabella 6.10: Valori annui delle grandezze che caratterizzano il bilancio idrologico per gli anni presi in esame

Bilancio idrologico			
Grandezza	Anno 2010	Anno 2016	Anno 2017
P [mm]	1327	910.3	492.2
E [mm]	117.3	106.7	103.2
D [mm]	937.3	524.3	112.7
$\Delta V_{storage}$ [mm]	273.1	274.6	267.46

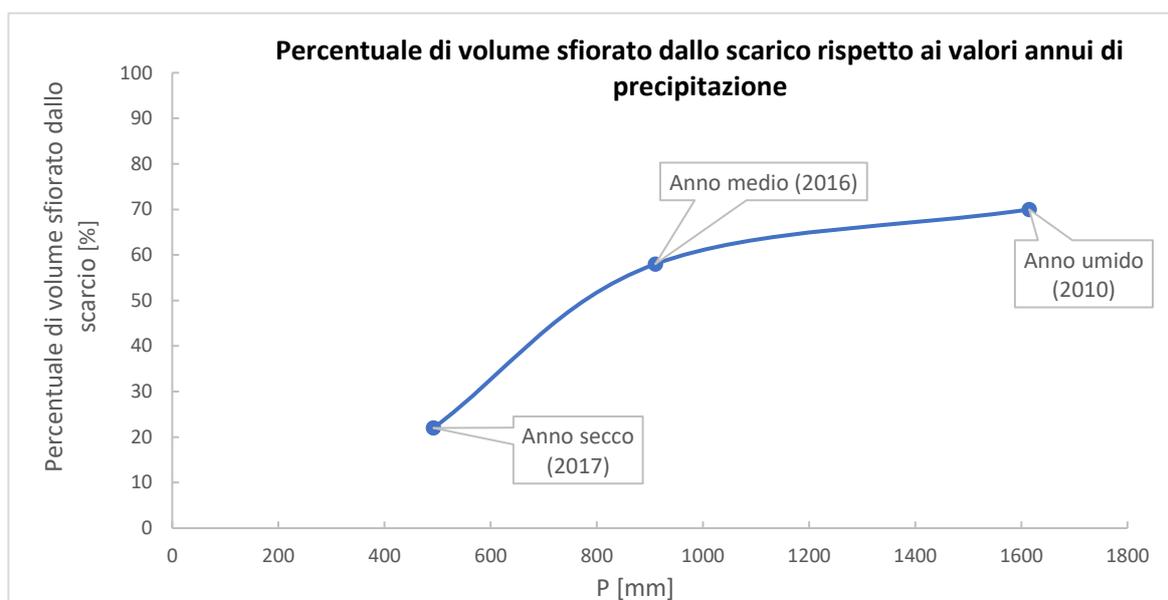


Figura 6.22 Confronto dell'andamento dei volumi all'interno della vasca di prima pioggia per le tre diverse simulazioni

Nel 2017, anno più secco, il valore di evapotraspirazione richiesta dal sistema viene soddisfatto, mediante il sistema di pompaggio presente all'interno della vasca di prima pioggia, con un'aliquota del 79%; tale dato mette in evidenza la necessità di inserire un sistema di pompaggio aggiuntivo collocato all'interno della vasca di raccolta che dovrà essere in grado di soddisfare il fabbisogno idrico giornaliero del verde pensile anche nei periodi di maggiore siccità.

Confrontando i volumi che vengono immagazzinati all'interno della vasca di raccolta, si osserva uno stesso andamento nei tre anni di simulazione, in particolare nell'anno 2010 si raggiunge il valore massimo di volume all'interno della vasca (si registra un volume di 334.2 m³). Dalla Figura 6.23 si nota che i tempi di riempimento della vasca di raccolta sono differenti, in particolare nel 2016 il riempimento della vasca si verifica dopo 130 giorni dall'inizio della simulazione (11/05/2016), nel 2010 il riempimento avviene dopo 126 giorni dall'inizio della simulazione (10/05/2010) e nel 2017 la profondità massima dell'acqua all'interno della vasca si raggiunge dopo 183 giorni dall'avvio della simulazione (11/07/2017).

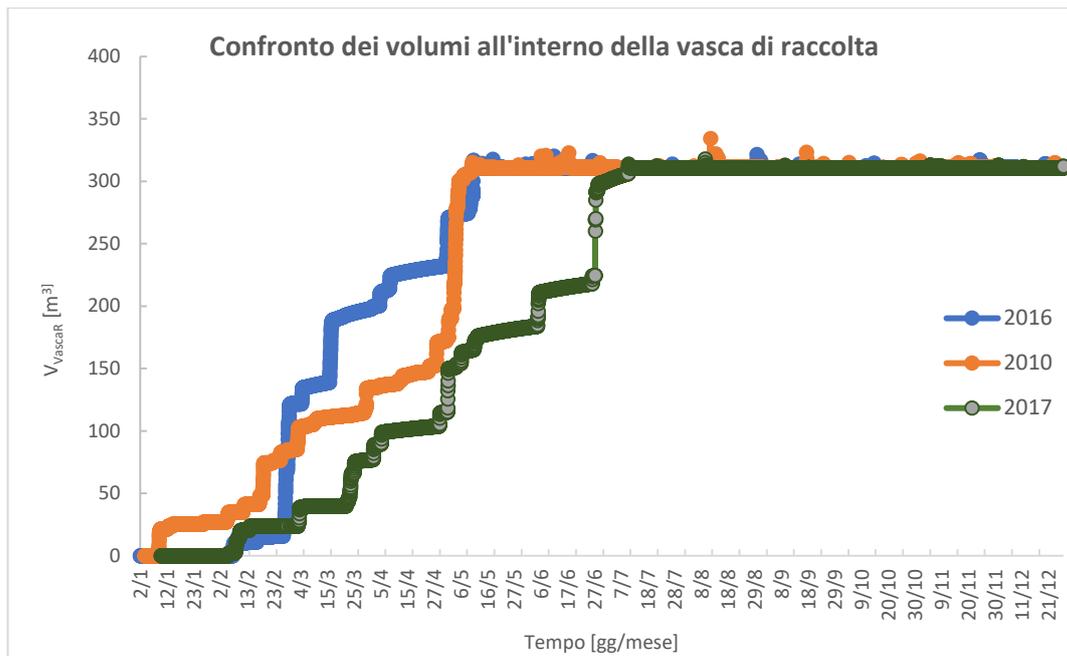


Figura 6.23 Confronto dell'andamento dei volumi all'interno della vasca di raccolta per le tre diverse simulazioni

Dal confronto delle tre simulazioni si evince un complessivo buon funzionamento del sistema, con assenza di punti di allagamento e un andamento distribuito delle portate che giungono all'interno del sistema di collettamento fognario, garantendo in tal modo di scongiurare ipotetiche crisi del sistema fognario provocate da eventi meteorici estremi e la possibilità di inserire un nuovo sistema di pompaggio all'interno della vasca di raccolta per garantire il fabbisogno idrico giornaliero del verde pensile, posto al di sopra della vasca interrata, anche nei periodi di maggiore siccità.

CONCLUSIONI

L'azione dei cambiamenti climatici provoca conseguenze che impattano su ambiente, società ed economia. Le soluzioni a tali cambiamenti mirano ad individuare delle strategie d'azione per mitigarne gli effetti e a definire piani di adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici. Tra gli effetti provocati dai cambiamenti climatici si hanno l'aumento dell'intensità e della frequenza di eventi meteorici estremi che impattano sulle aree urbane e producono allagamenti e gravi danni socioeconomici. È necessario perciò definire una nuova soluzione di gestione dei sistemi di drenaggio urbano, in grado di renderne più efficiente il sistema. Si tratta dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile che hanno effetti positivi sulla gestione della quantità d'acqua, ne migliorano la qualità dell'acqua consentendone il suo riutilizzo per l'irrigazione delle aree vegetate e per il lavaggio degli esterni di un'abitazione. È di fondamentale importanza gestire e controllare l'afflusso meteorico che giunge sulle aree urbane. È inoltre necessario evitare che il sistema di drenaggio entri in crisi, che si verifichino rigurgiti o sfioramenti incontrollati

Il presente lavoro di tesi si occupa di analizzare il funzionamento di un sistema di gestione delle acque meteoriche attualmente in fase di realizzazione presso il Politecnico di Torino. Il Laboratorio green-court-lab si compone di un canale di raccolta delle acque meteoriche, di una vasca di prima pioggia, di una vasca di raccolta e di una tecnologia LID (cella di bioritenzione) che è posizionata sulla vasca di raccolta.

Il funzionamento del sistema è stato valutato mediante l'esecuzione di simulazioni numeriche condotte attraverso l'ausilio del codice di calcolo numerico SWMM; le simulazioni hanno riguardato i dati orari di precipitazione osservati dalla stazione pluviometrica Torino via della Consolata nell'anno 2010 e 2017 e dal pluviometro presente nella sede centrale del Politecnico per l'anno 2016.

Le tre simulazioni hanno consentito l'analisi della risposta del sistema per i tre anni presi in esame e che rappresentavano l'anno umido, secco e medio.

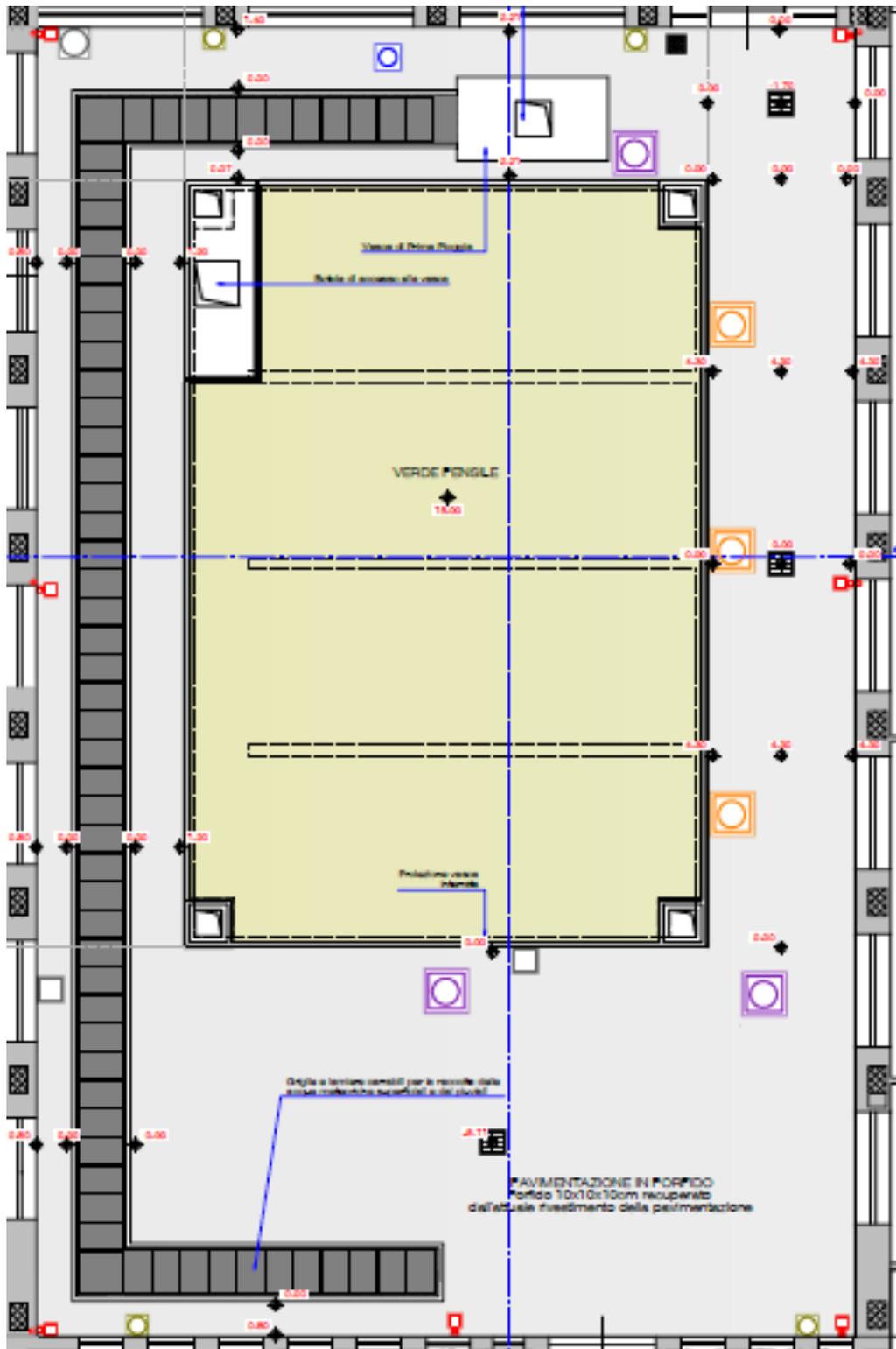
I risultati delle tre simulazioni sono stati definiti mediante le grandezze che caratterizzano il bilancio idrologico, il quale è stato valutato a scala mensile e annua a partire dai dati meteorologici e viene descritto analizzando i flussi in ingresso, in uscita e i volumi immagazzinati, attraverso l'equazione di continuità. Il contributo di evapotraspirazione è stato valutato mediante la modellazione di una vasca (storage unit) virtuale con superficie pari all'area del verde pensile e alimentata da un sistema di 12 pompe aventi ognuna la portata corrispondente al valore di ET richiesta. A ciascuna pompa è stata assegnata un valore di portata corrispondente al valore mensile di evapotraspirazione potenziale (ET) richiesta. Il sistema di pompaggio all'interno della vasca di prima pioggia, che definisce un contributo virtuale di evapotraspirazione, è in grado di soddisfare il valore di evapotraspirazione richiesta con un'aliquota del 90% per l'anno umido, dell'82% per l'anno medio e del 79% per l'anno secco. Per soddisfare appieno il fabbisogno idrico giornaliero del verde pensile è necessario inserire un sistema di pompaggio all'interno della vasca di raccolta, il quale dovrà soddisfare il 10% per l'anno umido, il 18% per l'anno in cui cadono dei valori di precipitazione media e il 20% per l'anno siccitoso di evapotraspirazione che il sistema di pompaggio nella vasca di raccolta non è stato in grado di definire.

Dalla definizione delle tre simulazioni che hanno consentito di valutare il comportamento del sistema del Laboratorio si evince un complessivo funzionamento ottimale del sistema con assenza di nodi allagati e un andamento distribuito delle portate che giungono all'interno del sistema di collettamento fognario (la percentuale di volume sfiorato dallo scarico del sistema è del 70% nel 2010, del 22% nel 2017 e del 58% nel 2016) garantendo in tal modo di scongiurare ipotetiche crisi del sistema fognario

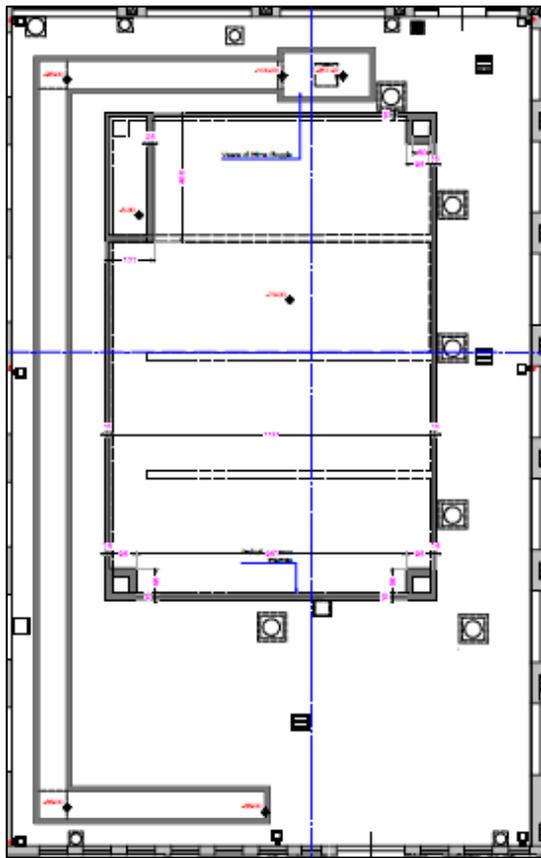
provocate da eventi meteorici estremi e la possibilità di inserire un nuovo sistema di pompaggio all'interno della vasca di raccolta per garantire il fabbisogno idrico giornaliero del verde pensile, posto al di sopra della vasca interrata, anche nei periodi di maggiore siccità. I volumi d'acqua all'interno della vasca di raccolta potranno essere utilizzati per diversi scopi, uno di questi vedrà l'utilizzo dell'acqua raccolta per alimentare un simulatore di pioggia.

ALLEGATI

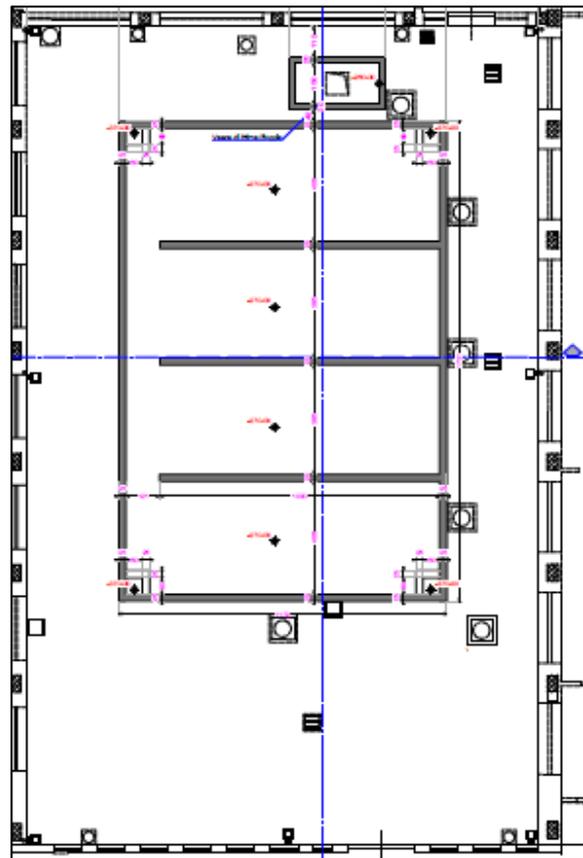
ALLEGATO 1: Piante e sezioni del progetto esecutivo “Ristrutturazione spazi per la realizzazione del Laboratorio cc-green-court-lab presso la sede centrale”



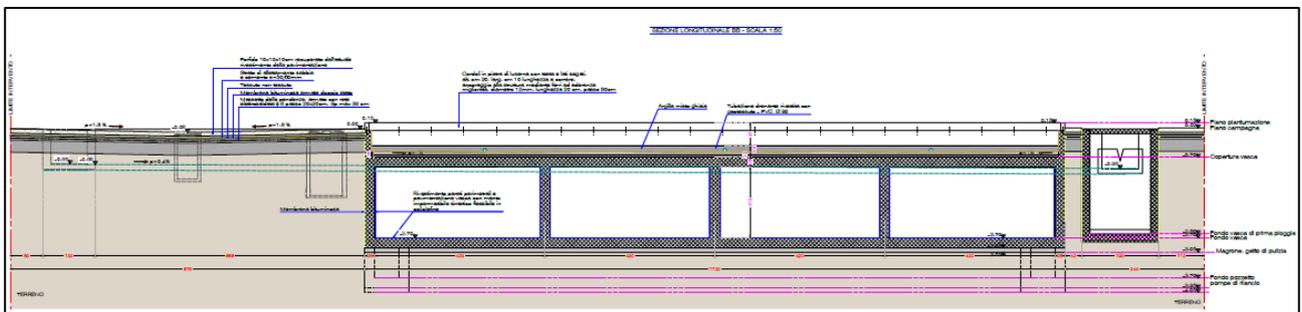
Planimetria piano campagna (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)



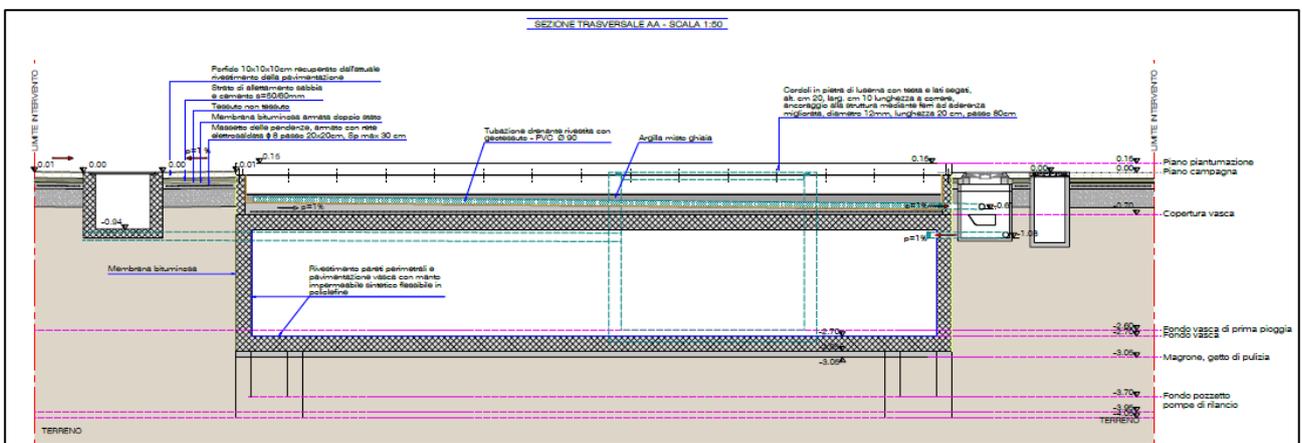
Planimetria piano campagna
(tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)



Planimetria fondo vasca
(tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)



Sezione longitudinale (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)

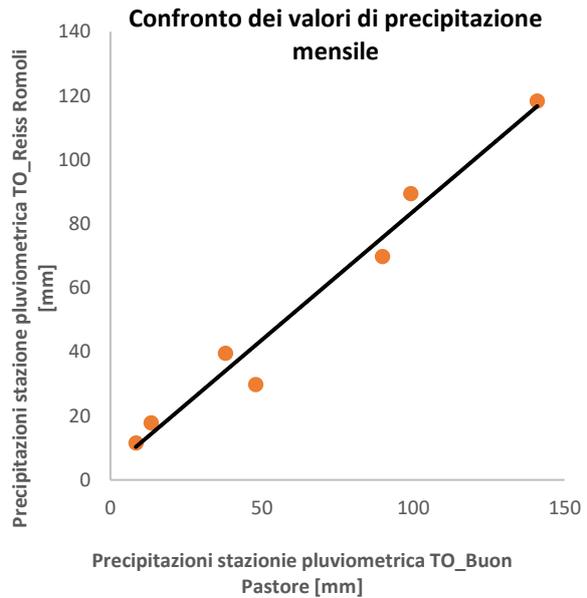
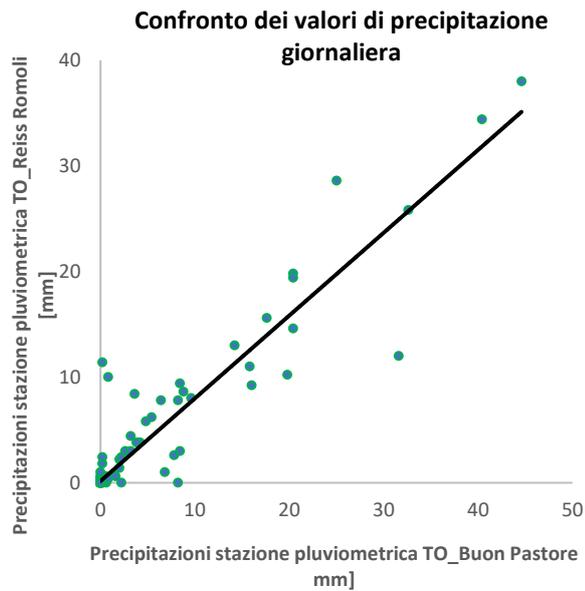


Sezione trasversale (tratto da elaborati del Progetto Esecutivo)

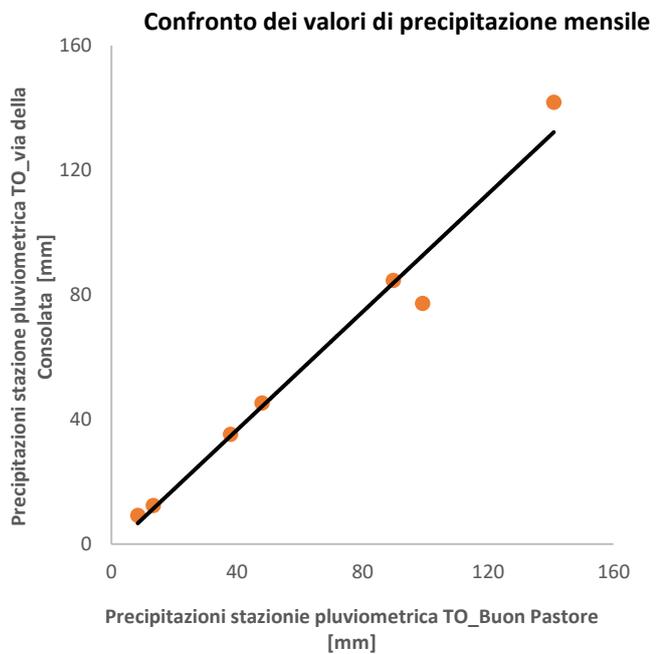
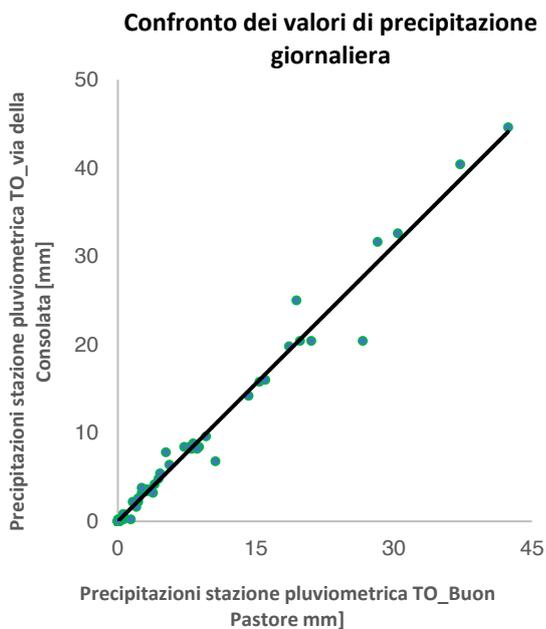
ALLEGATO 2: Confronto delle precipitazioni giornaliere e mensili registrate dalle stazioni pluviometriche

Confronto dei valori di precipitazioni giornaliere e mensili registrate dalle stazioni pluviometriche prese in analisi.

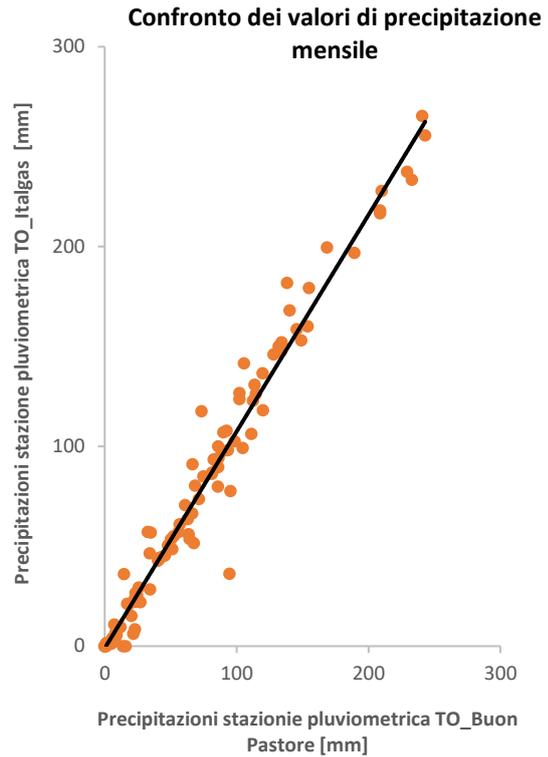
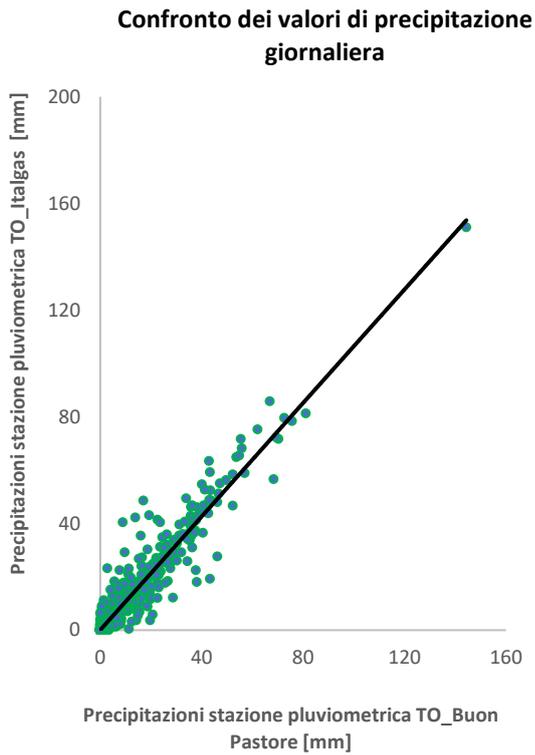
- TO_Buon Pastore – TO_Reiss Romoli



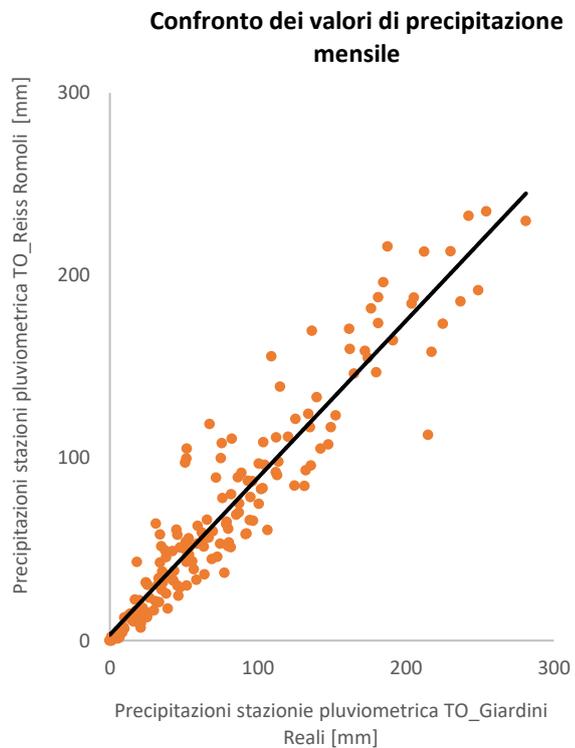
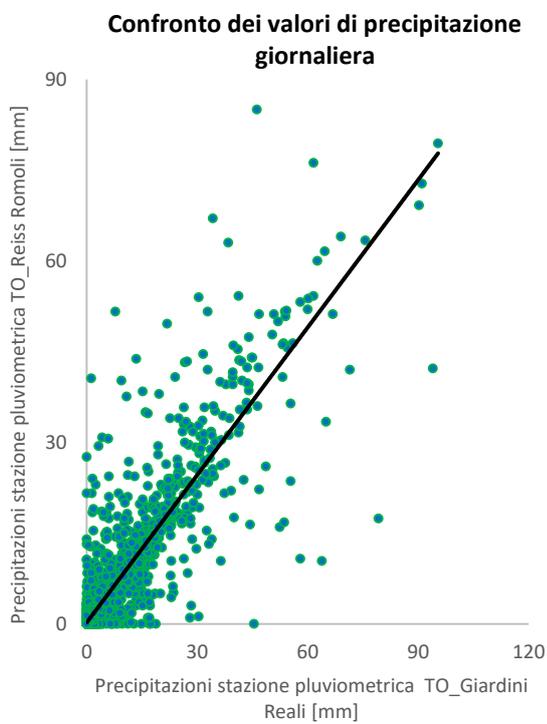
- TO_Buon Pastore – TO_via della Consolata



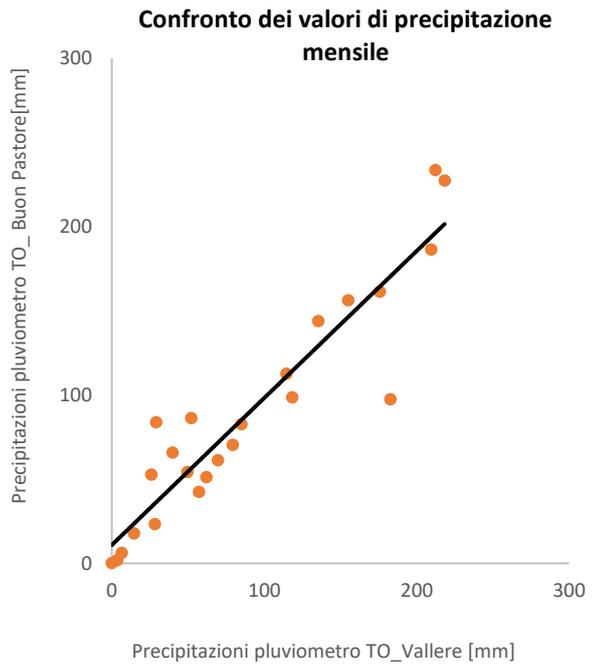
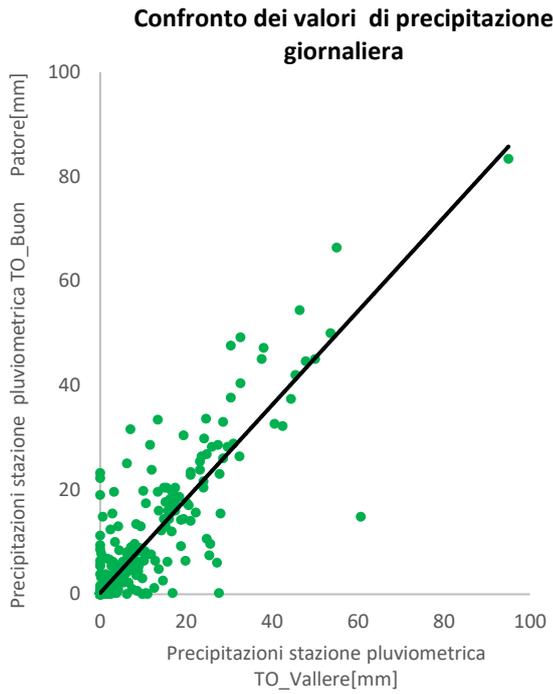
- TO_Buon Pastore – TO_Italgas



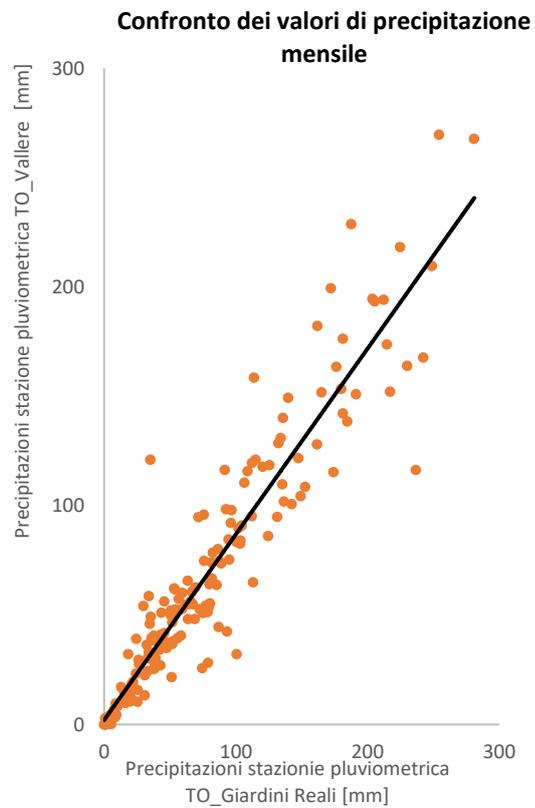
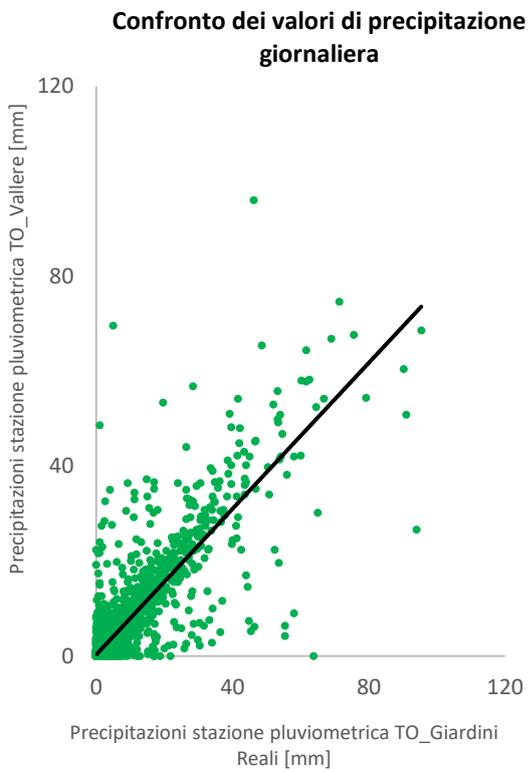
- TO_Giardini Reali – TO_Reiss Romoli



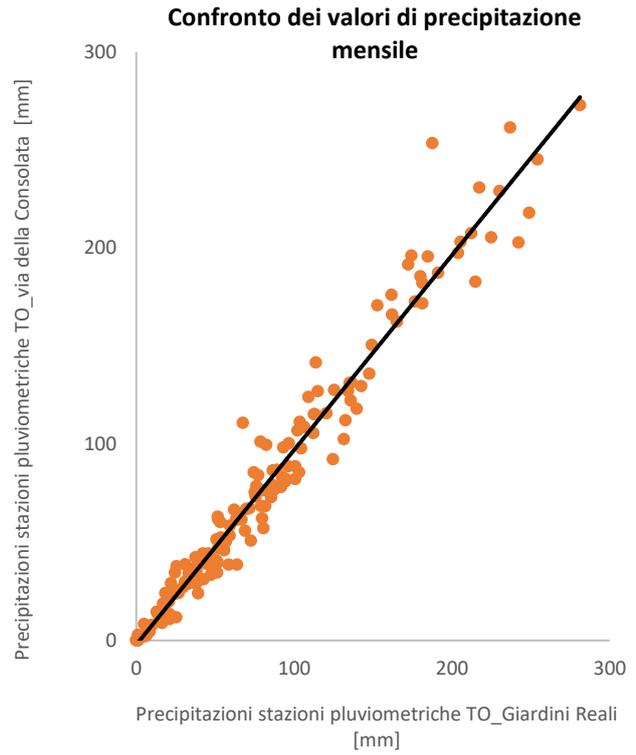
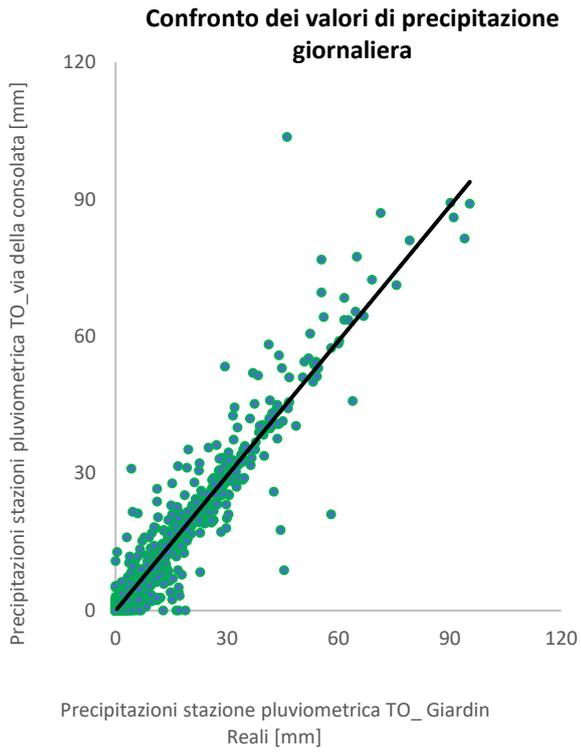
- TO_Buon Pastore – Vallere



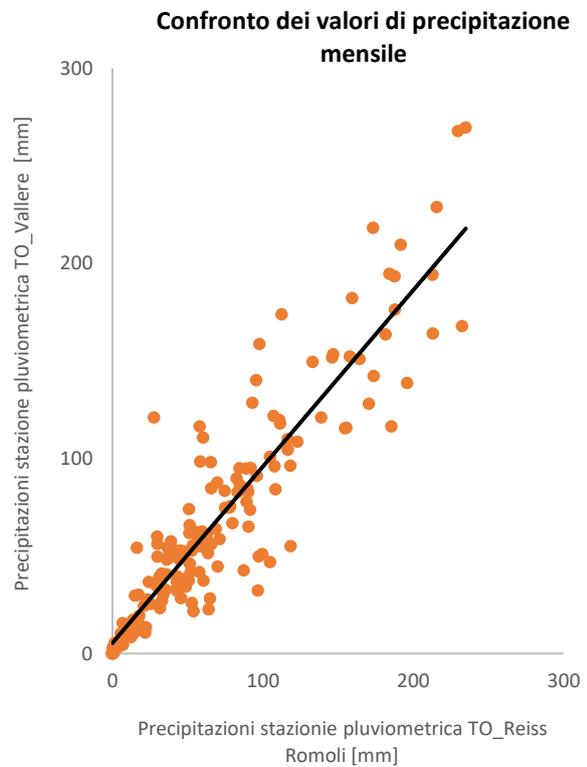
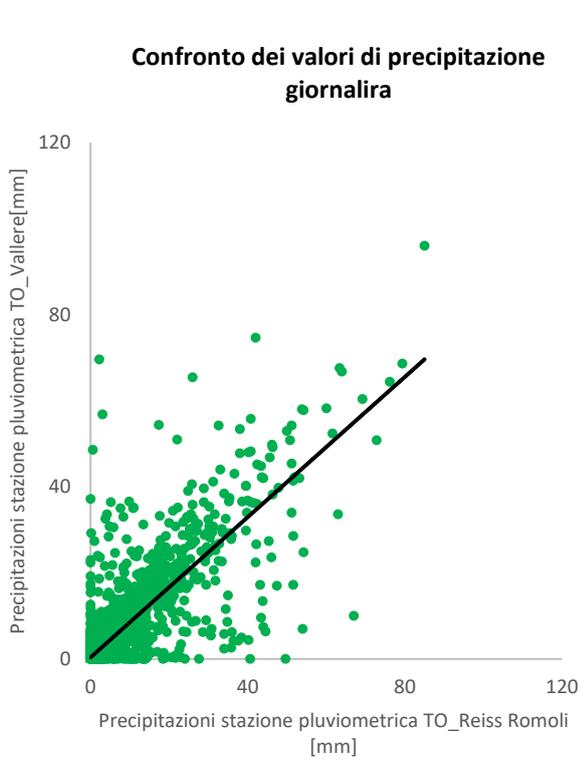
- TO_Giardini Reali – Vallere



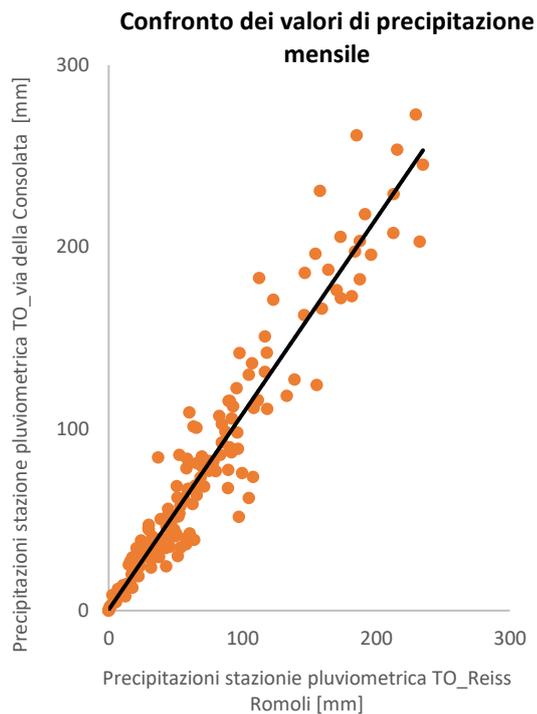
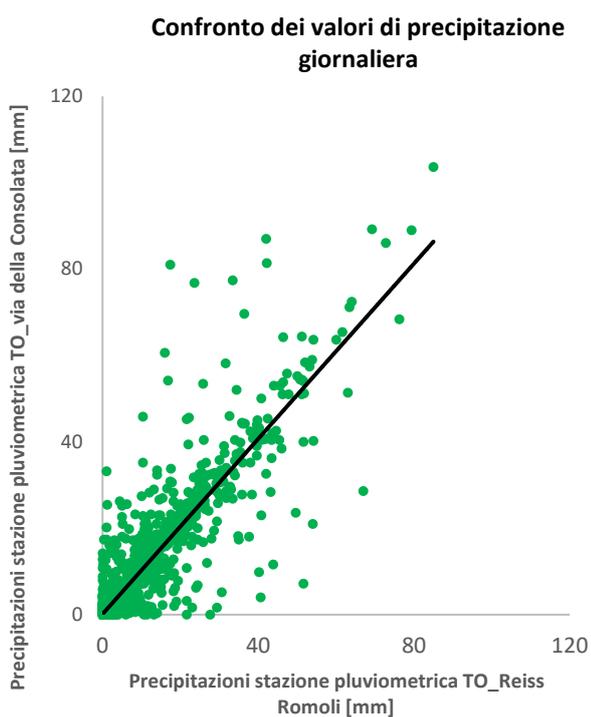
- TO_Giardini Reali – TO_via della Consolata



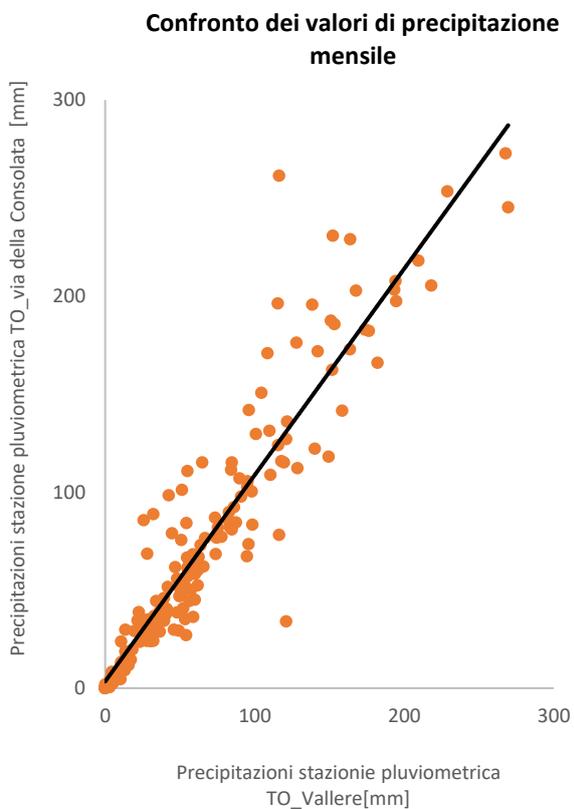
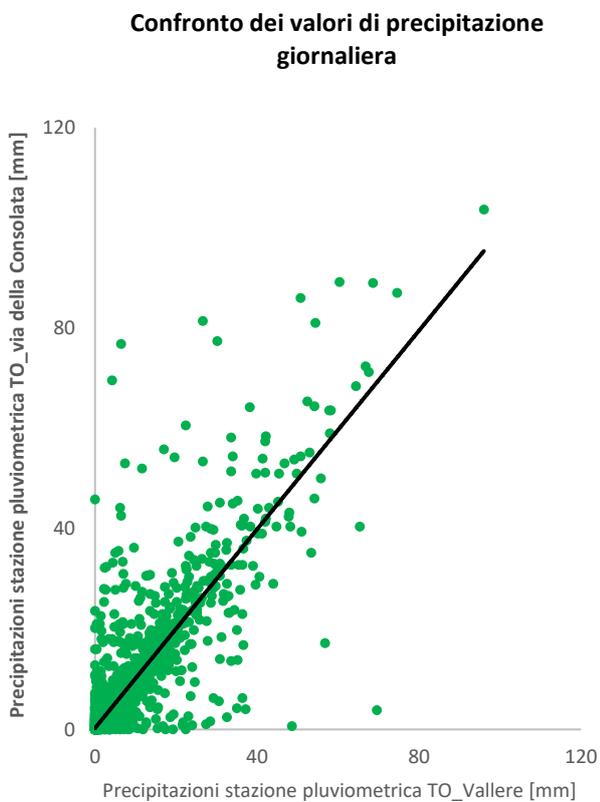
- TO_Reiss Romoli –TO_Vallere



- TO_Reiss Romoli –TO_via della Consolata



- TO_Vallere – TO_via della Consolata



ALLEGATO 3: Report della simulazione numerica condotta per l'anno umido

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.1 (Build 5.1.013)

 Laboratotio cc-green-court-lab

Rainfall File Summary

Station ID	First Date	Last Date	Recording Frequency	Periods w/Precip	Periods Missing	Periods Malfunc.
------------	------------	-----------	---------------------	------------------	-----------------	------------------

STA 01/04/2010	12/26/2010	60 min	728	0	0
----------------	------------	--------	-----	---	---

Analysis Options

Flow Units LPS

Process Models:

Rainfall/Runoff YES

RDII NO

Snowmelt NO

Groundwater NO

Flow Routing YES

Ponding Allowed NO

Water Quality NO

Infiltration Method HORTON

Flow Routing Method DYNWAVE

Surcharge Method EXTRAN

Starting Date 01/04/2010 04:00:00

Ending Date 12/26/2010 12:00:00

Antecedent Dry Days 0.0

Report Time Step 01:00:00

Wet Time Step 00:01:00

Dry Time Step 01:00:00

Routing Time Step 1.00 sec

Variable Time Step YES

Maximum Trials 8

Number of Threads 1

Head Tolerance 0.001500 m

	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
Initial LID Storage	0.001	9.558
Total Precipitation	0.161	1327.000
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.000	0.000
Surface Runoff	0.134	1105.227

LID Drainage 0.023 191.866
 Final Storage 0.005 40.001
 Continuity Error (%) -0.040

```

*****
Flow Routing Continuity      Volume      Volume
                             hectare-m   10^6 ltr
***** -----
Dry Weather Inflow .....    0.000    0.000
Wet Weather Inflow .....    0.158    1.578
Groundwater Inflow .....    0.000    0.000
RDII Inflow .....          0.000    0.000
External Inflow .....       0.000    0.000
External Outflow .....      0.110    1.100
Flooding Loss .....         0.000    0.000
Evaporation Loss .....      0.000    0.000
Exfiltration Loss .....     0.000    0.000
Initial Stored Volume ....   0.000    0.000
Final Stored Volume .....   0.046    0.465
Continuity Error (%) .....  0.488
  
```

Time-Step Critical Elements

Link CCV2 (1.31%)

Highest Flow Instability Indexes

All links are stable.

Routing Time Step Summary

Minimum Time Step : 0.50 sec
 Average Time Step : 1.00 sec
 Maximum Time Step : 1.00 sec
 Percent in Steady State : -0.00
 Average Iterations per Step : 2.00
 Percent Not Converging : 0.00

ALLEGATO 4: Report della simulazione numerica condotta per l'anno secco

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.1 (Build 5.1.013)

 Laboratotio cc-green-court-lab

Rainfall File Summary

Station ID	First Date	Last Date	Recording Frequency	Periods w/Precip	Periods Missing	Periods Malfunc.
------------	------------	-----------	---------------------	------------------	-----------------	------------------

STA	01/10/2017	12/27/2017	60 min	358	0	0
-----	------------	------------	--------	-----	---	---

Analysis Options

Flow Units LPS

Process Models:

Rainfall/Runoff YES

RDII NO

Snowmelt NO

Groundwater NO

Flow Routing YES

Ponding Allowed NO

Water Quality NO

Infiltration Method HORTON

Flow Routing Method DYNWAVE

Surcharge Method EXTRAN

Starting Date 01/10/2017 13:00:00

Ending Date 12/27/2017 13:00:00

Antecedent Dry Days 0.0

Report Time Step 01:00:00

Wet Time Step 00:01:00

Dry Time Step 01:00:00

Routing Time Step 1.00 sec

Variable Time Step YES

Maximum Trials 8

Number of Threads 1

Head Tolerance 0.001500 m

	Volume	Depth
	hectare-m	mm

Initial LID Storage	0.001	9.558
Total Precipitation	0.060	492.200

Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	0.000	0.000
Surface Runoff	0.050	409.764
LID Drainage	0.009	70.007
Final Storage	0.003	22.196
Continuity Error (%)	-0.042	

*****	Volume	Volume
Flow Routing Continuity	hectare-m	10^6 ltr
*****	-----	-----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.058	0.584
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	0.000	0.000
External Outflow	0.013	0.133
Flooding Loss	0.000	0.000
Evaporation Loss	0.000	0.000
Exfiltration Loss	0.000	0.000
Initial Stored Volume	0.000	0.000
Final Stored Volume	0.045	0.447
Continuity Error (%)	0.531	

Time-Step Critical Elements

None

Highest Flow Instability Indexes

All links are stable.

Routing Time Step Summary

Minimum Time Step : 0.50 sec

Average Time Step : 1.00 sec

Maximum Time Step : 1.00 sec

Percent in Steady State : -0.00

Average Iterations per Step : 2.00

Percent Not Converging : 0.00

ALLEGATO 5: Report della simulazione numerica condotta per l'anno umido

EPA STORM WATER MANAGEMENT MODEL - VERSION 5.1 (Build 5.1.013)

 Laboratotio cc-green-court-lab

Rainfall File Summary

Station ID	First Date	Last Date	Recording Frequency	Periods w/Precip	Periods Missing	Periods Malfunc.
------------	------------	-----------	---------------------	------------------	-----------------	------------------

STA	01/02/2016	12/21/2016	60 min	544	0	0
-----	------------	------------	--------	-----	---	---

Analysis Options

Flow Units LPS

Process Models:

Rainfall/Runoff YES

RDII NO

Snowmelt NO

Groundwater NO

Flow Routing YES

Ponding Allowed NO

Water Quality NO

Infiltration Method HORTON

Flow Routing Method DYNWAVE

Surcharge Method EXTRAN

Starting Date 01/02/2016 10:00:00

Ending Date 12/21/2016 12:00:00

Antecedent Dry Days 0.0

Report Time Step 01:00:00

Wet Time Step 00:01:00

Dry Time Step 01:00:00

Routing Time Step 1.00 sec

Variable Time Step YES

Maximum Trials 8

Number of Threads 1

Head Tolerance 0.001500 m

	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
Initial LID Storage	0.001	9.558
Total Precipitation	0.111	910.300
Evaporation Loss	0.000	0.000

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Infiltration Loss	0.000	0.000
Surface Runoff	0.092	757.796
LID Drainage	0.015	119.681
Final Storage	0.005	42.642
Continuity Error (%)	-0.028	

*****	Volume	Volume
Flow Routing Continuity	hectare-m	10 ⁶ ltr
*****	-----	-----
Dry Weather Inflow	0.000	0.000
Wet Weather Inflow	0.107	1.067
Groundwater Inflow	0.000	0.000
RDII Inflow	0.000	0.000
External Inflow	0.000	0.000
External Outflow	0.061	0.612
Flooding Loss	0.000	0.000

Bibliografia e Sitografia

Arpa Piemonte. Annali meteorologici ed idrologici. https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-meteorologica.html.

ARPA Piemonte. Il clima in Piemonte nel 2010. https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/rapporti-di-analisi/annuale_pdf/clima2010.pdf.

Arpa Piemonte, Dipartimento Sistemi Previsionali. 2018. *Bilancio idrico regionale delle acque*. Torino : s.n., 2018.

ARPA, Regione Piemonte . Eventi alluvionali in Piemonte- Evento del 21-25 novembre 2016. <http://www.arpa.piemonte.it/publicazioni-2/gli-eventi-alluvionali-in-piemonte>.

Bank, European Investment, et al. Aprile 2018. Linee guida sull'adozione di tecniche di drenaggio urbano sostenibile per una città più resiliente ai cambiamenti climatici. Aprile 2018.

Bracca G., Bussetini M., Lastonia B., Mariani S. 2013. *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici*. Roma : ISPRA, 2013.

Castellari S., Venturini S., Ballarin Denti A., Bigano A., Bindi M., Bosello F., Carrera L., Chiriaco M.V., Danovaro R., Desiato F., Filpa A., Gatto M., Gaudioso D., Giovanardi O., Giupponi C., Gualdi S., Guzzetti F., Lapi M., Luise A., Marino G., Mysiak J., et al. 2014. *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*. Roma : Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014.

Citrini, D e Nosedà, G. 1987. *Idraulica*. Milano : Casa Editrice Ambrosiana, 1987.

D.M. 28 luglio 2004. *Linee guida per la predisposizione del bilancio idrico di bacino, comprensive dei criteri per il censimento delle utilizzazioni in atto e per la definizione del minimo deflusso vitale, di cui all'art. 22, comma 4, del D. lgs. 11 maggio 1999, n. 152*.

Da Deppo L. e Datei C. 2009. *Fognature*. VI. Padova : Libreria internazionale Cortina, 2009.

Desiato, F, et al. 2011. *Gli indicatori del CLIMA in Italia nel 2010 (ANNO 2010)*. Roma : ISPRA, Stato dell'Ambiente 24/2011, 2011.

Desiato, F, et al. 2017. *Gli indicatori del CLIMA in Italia nel 2016 (ANNO XII)*. Roma : ISPRA, Stato dell'Ambiente 72/2017, 2017.

Desiato, F, et al. 2018. *Gli indicatori del CLIMA in Italia nel 2017 (ANNO XIII)*. Roma : ISPRA, Stato dell'Ambiente 80/2018, 2018.

DPCM. 04/03/1996. Disposizioni in materia di risorse idriche. 04/03/1996.

Fletcher, T.D., et al. 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*. 2015, 525-542.

Forestieri A, et al. 2018. The impact of climate change on extreme precipitation in Sicily, Italy. 2018, Vol. Fowler H, Noto LV, 1-17.

Gibelli G., Gelmini A., Pagnoni E., Natalucci F., 2015. *GESTIONE SOSTENIBILE DELLE ACQUE URBANE. MANUALE DI DRENAGGIO 'URBANO'. Perché, Cosa, Come*. Milano : Regione Lombardia, Ersaf, 2015.

Gironas, J., Roesner, L.A. e Davis, J. 2009. *Storm Water Management Model Applications Manual*. Washington : EPA/600/R-09/000, 2009.

Masseroni, D, et al. 2018. *Manuale sulle buone pratiche di utilizzo dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile*. s.l. : Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali dell'Università degli Studi di Milano e Gruppo CAP, 2018.

Perin, R., et al. 2019. Realizzazione del modello di simulazione numerica della linea acque a supporto del progetto di ampliamento di depurazione di Udine. Aprile 2019, Vol. 6, 1/2019, p. 3-16.

Piro, P, et al. 2017. Strategie sostenibili e Controllo in tempo reale (RTC) per la mitigazione degli allagamenti in ambiente urbano. Applicazioni sulla rete di drenaggio della città di Cosenza. *L'ACQUA*. 2017, Vol. 3, 88-92.

QGIS. QGIS - Il Leader dei Software GIS Desktop Open Source. <https://www.qgis.org/it/site/about/index.html>.

Regione Lombardia. Banca dati del Consiglio Regionale della Lombardia. <https://normelombardia.consiglio.regione.lombardia.it/NormeLombardia/Accessibile/main.aspx?view=showdoc&iddoc=rr002006032400004>.

Rossman, L.A. e Huber, W.C. 2015. *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology*. s.l. : US EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-15/162A, 2015.

Rossman, L. 2015. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. s.l. : US EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-14/413 (NTIS EPA/600/R-14/413b), 2015.

Rossman, L. AND W. Huber. 2016. *Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality*. s.l. : US EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-16/093, 2016.

Rossman, L. 2017. *Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics*. s.l. : U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-17/111, 2017.

Shukla, P., et al. 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. s.l. : IPCC, 2019.

Sistemi Previsionali - Arpa Piemonte. Il Clima in Piemonte, 2017. https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/rapporti-di-analisi/annuale_pdf/anno_2017.pdf.

Sistemi Previsionali - ARPA Piemonte. L'idrologia i Piemonte, 2016. <http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/idrologia-e-neve/idrologia-ed-effetti-al-suolo/documenti-e-dati/lidrologia-in-piemonte-2016>.

Tran, H, Molavi, S e Muttil, N. 2011. Assessment Framework for the Impacts of Climate Change and Urbanization on Urban Drainage Systems. 2011, 1403-1412.

Woods Ballard, B., et al. 2015. *The SuDS Manual*. London, UK : C753, CIRIA, 2015.

WWAP . 2017. *The United Nations World Water Development Report 2017*. Paris, UNESCO : Wastewater: The Untapped Resource, 2017.

Zhou, Q. 2014. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *water*. 2014, Vol. 6, 976-992.

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato, desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito a rendere questo percorso un'opportunità di crescita personale e accademica.

Ringrazio il Professore Fulvio Boano e la Professoressa Stefania Tamea, che con dedizione e disponibilità hanno consentito la realizzazione dell'elaborato di tesi.

Ringrazio la mia famiglia e Gianluca, che hanno creduto in me.

Ringrazio gli amici di SEMPRE, che seppur lontani sono sempre stati presenti.

Ringrazio gli amici e i colleghi, che hanno reso unico questo periodo.

“Tutte le cose che sono veramente grandi, a prima vista sembrano impossibili” (F. Nietzsche)