



Politecnico  
di Torino

# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile  
Anno accademico 2021/2022  
Sessione di Laurea marzo 2022

## ***Applicazione di sistemi di drenaggio sostenibile per l'adattamento ai cambiamenti climatici: analisi di un caso studio nel comune di Torino***

Relatori:

Prof. Ing. Fulvio Boano

Candidati:

Paolo Cavallaro, 253234

Correlatori:

Ing. Anacleto Rizzo





## Sommario

<b>Introduzione</b> .....	<b>1</b>
<b>Problematiche connesse alle attuali tecniche di drenaggio urbano</b> .....	<b>4</b>
1.1 Problematiche connesse all'incremento dell'urbanizzazione e ai cambiamenti climatici in atto in merito alle attuali tecniche di gestione delle acque di pioggia.....	5
<b>SuDS (Sustainable urban Drainage Systems)</b> .....	<b>13</b>
2.1 ..... La filosofia delle LID .....	<b>14</b>
2.1.1 Gestire quantità d'acqua.....	15
2.1.2 Migliorare qualità dell'acqua .....	16
2.1.3 Generare amenità.....	18
2.1.4 Incentivare biodiversità.....	19
2.2 ..... Descrizione delle varie unità LID .....	<b>19</b>
2.2.1 Tetti verdi.....	19
2.1.2 Aree di bioritenzione (rain garden).....	23
2.1.3 Altre unità .....	25
2.3 ..... Indicatori d'impatto per le unità LID .....	<b>26</b>
2.3.1 Indicatori di quantità.....	26
2.3.2 Indicatori di qualità di acqua.....	27
2.3.3 Indicatori per il rischio naturale, per la resilienza climatica e per la qualità dell'aria.....	27
Infine, tra i possibili indicatori d'impatto per la valutazione dei rischi naturali, della resilienza climatica e della qualità dell'aria, vi sono: .....	27
<b>Software SWMM (Storm Water Management Model)</b> .....	<b>28</b>
3.1 ..... Modello concettuale .....	<b>30</b>
3.2 ..... Introduzione in SWMM degli elementi della rete di drenaggio .....	<b>33</b>
3.2.1 Modulo idrologico (Hydrology) .....	34

3.2.2	Modulo idraulico (Hydraulics) .....	35
3.2.3	Modulo qualità (quality).....	41
3.2.4	Moduli minori .....	41
3.3	..... Opzioni di simulazione	
	.....	<b>42</b>
3.3.1	Deflusso superficiale .....	44
3.3.2	Metodo di infiltrazione del Curve Number (CN) .....	47
3.3.3	Modello dell'onda cinematica (Kinematic Wave).....	53
3.4	..... Inserimento unità LID e funzionamento in SWMM	
	.....	<b>56</b>
3.4.1	Equazioni per le Bio-Retention Cells .....	59
3.4.2	Equazioni per i Green Roofs.....	61
<b>Progetto pilota</b>	.....	<b>64</b>
4.1	..... Contesto e obiettivi	
	.....	<b>64</b>
4.2	..... Sito e motivazioni	
	.....	<b>66</b>
4.3	..... Progetto	
	.....	<b>67</b>
4.3.1	Tetto verde .....	70
4.3.2	Rain garden .....	75
4.3.3	Serbatoi d'accumulo .....	77
4.3.3.1	Serbatoio interrato .....	77
4.3.3.2	Cisterna.....	80
4.3.4	<b>Budget</b> .....	<b>81</b>
4.4	..... Impatto atteso	
	.....	<b>81</b>
<b>Costruzione del modello su SWMM</b>	.....	<b>82</b>
5.1	..... Modellazione oggetti rete di drenaggio	
	.....	<b>83</b>

5.1.1.	Costruzione modello per scenario pre-intervento pilota.....	83
5.1.2.	Costruzione modello per scenario post-intervento .....	85
5.2.	..... Inserimento dati pluviometrici	
	.....	<b>87</b>
5.2.1.	Simulazioni annuali .....	88
5.2.2.	Simulazioni per eventi orari e giornalieri con TR di 2, 10 e 50 anni .....	89
5.2.3	Simulazione annuale per scenari di cambiamento climatico .....	89
5.3	..... Inserimento dati di evapotraspirazione	
	.....	<b>90</b>
5.4	..... Modellazione unità LID	
	.....	<b>91</b>
5.4.3	Modellazione rain garden .....	91
5.4.2	Modellazione green roof.....	94
<b>Analisi e discussione dei risultati</b> .....		<b>96</b>
6.1	..... Output significativi	
	.....	<b>96</b>
6.2	..... Risultati per simulazioni annuali	
	.....	<b>97</b>
6.2.1	Simulazione anno secco (2017).....	97
6.2.2	Simulazione anno molto piovoso (2010).....	102
6.3	.....Risultati per simulazioni per singolo evento	
	.....	<b>106</b>
6.3.1	Simulazione per evento orario con TR=2 anni .....	107
6.3.2	Simulazione per evento orario con TR=10 anni .....	109
6.3.3	Simulazione per evento orario con TR=50 anni .....	110
6.3.4	Simulazione per evento giornaliero con TR=2 anni.....	112
6.3.5	Simulazione per evento giornaliero con TR=10 anni.....	113
6.3.6	Simulazione per evento giornaliero con TR=50 anni.....	115
6.4	..... Risultati delle simulazioni annuali per scenari di cambiamento climatico	
	.....	<b>118</b>

6.4.1	Simulazione annuale per scenario SSP585 (media anni piovosi).....	119
6.4.2	Simulazione annuale per scenario SSP585 (media anni secchi) .....	122
6.5	..... Considerazioni aggiuntive e confronto tra le simulazioni .....	<b>126</b>
<b>Conclusioni</b>	.....	<b>128</b>
<b>Bibliografia e sitografia</b>	.....	<b>131</b>



# Introduzione

La rapida e crescente urbanizzazione, che da qualche decennio interessa il nostro pianeta, ha causato forti mutazioni del tessuto urbano, come un notevole aumento delle superfici impermeabili, e un'intensificazione del naturale ciclo idrologico. Questi cambiamenti, per quanto prevedibili, sono stati spesso ignorati in sede di progetto degli esistenti sistemi di drenaggio delle acque meteoriche di dilavamento, elementi storicamente trattati senza la necessaria pianificazione.

Tali fattori fanno sì che le acque che scorrono sulle superfici urbane arrivino nei collettori fognari con velocità elevate che, sempre più frequentemente, li mandano in crisi, con conseguenze anche pericolose come esondazione dei corpi idrici ricettori o allagamenti in prossimità dei pozzetti della rete, in seguito anche a eventi di pioggia non eccezionali.

Ai problemi idraulici, si affiancano quelli legati agli impatti delle fognature miste e bianche sulla qualità dei corpi idrici superficiali e sotterranei, causati dal trascinarsi da parte delle acque di dilavamento di sostanze solide e inquinanti che si accumulano sulle superfici drenate nei periodi di tempo secco.

I **sistemi di drenaggio urbano sostenibile (SuDS - Sustainable Drainage Systems)** hanno lo scopo di gestire le acque di pioggia ricadenti in aree urbane in modo da mitigare gli impatti dell'urbanizzazione e del cambiamento climatico sui sistemi di drenaggio in ambito urbano. Essi cercano di riequilibrare il naturale ciclo idrologico e ridurre il carico inquinante immesso nei corpi idrici, sfruttando infrastrutture verdi in grado

di trarre tutti i benefici forniti dai servizi ecosistemici delle soluzioni naturali (*nature-based solutions*).

In tale contesto si pone il progetto pilota attuato presso l'ostello Open 011, situato nella zona Nord di Torino. L'intervento in questione si colloca nell'ambito del progetto europeo CWC (City Water Circles) e segue i principi di gestione sostenibile dell'acqua, attuando uno schema di raccolta dell'acqua piovana, volto a riutilizzare le acque meteoriche raccolte per l'irrigazione di un *tetto verde* e di una coltivazione aeroponica, nonché alla mitigazione delle inondazioni pluviali e alla ricarica controllata della falda acquifera in contesto urbano, grazie all'installazione di un *rain garden*. L'obiettivo della presente tesi è quello di effettuare un'analisi idraulica del sistema descritto, con l'ausilio del software SWMM (Storm Water Management Model), atta a valutare l'efficienza del sistema, in termini di percentuale di acqua piovana infiltrata nel terreno.

Un ulteriore aspetto interessante, che questo lavoro si prefigge di indagare, è legato al ruolo che le tecniche di drenaggio urbano sostenibile potrebbero ricoprire nella mitigazione di eventi meteorici estremi legati agli scenari di cambiamento climatico già inesorabilmente in atto.

Tale tesi è costruita principalmente a partire da ricerche mirate su materiale bibliografico e informatico, sebbene sia arricchita da elementi direttamente riportati su documenti redatti nell'ambito del progetto pilota CWC e spunti offerti da colloqui avuti con gli addetti ai lavori. Essa è strutturata nel seguente modo:

- **Capitolo 1:** vengono introdotte le problematiche che la crescente urbanizzazione, in concomitanza ai cambiamenti climatici in atto, ha causato alle attuali tecniche di drenaggio.
- **Capitolo 2:** in tale sezione si fa luce sulle soluzioni basate sullo sfruttamento di servizi naturali che, se opportunamente integrate, possono mitigare i rischi associati ai sistemi di drenaggio urbano.
- **Capitolo 3:** si descrive il software SWMM utilizzato per effettuare le analisi idrauliche di interesse.
- **Capitolo 4:** viene descritto il progetto pilota CWC attuato presso l'ostello Open011 di Torino.
- **Capitolo 5:** vengono illustrati i parametri con cui è stato modellato il sistema previsto dall'intervento pilota su SWMM.
- **Capitolo 6:** si elencano e si commentano i risultati ottenuti dalla simulazione eseguita in SWMM.

# Capitolo 1

## Problematiche connesse alle attuali tecniche di drenaggio urbano

Fin da quando l'umanità ha trovato comodo aggregarsi all'interno di comunità stabili, la disponibilità di sorgenti idriche ha rappresentato il principale fattore attorno a cui sono nate e si sono sviluppate le città. Le civiltà di ogni epoca, basti pensare agli innegabili successi dell'ingegneria dell'antica Roma, hanno cercato di sviluppare conoscenze e tecnologie atte proprio all'approvvigionamento di tale risorsa, motore di ogni attività umana. Si può affermare che la relazione tra l'acqua e gli ambienti urbani è vecchia quanto la storia dell'umanità, e che lo sviluppo delle città (e delle civiltà) è avanzato di pari passo con la capacità tecnica dell'uomo di rispondere con successo alle molte questioni legate all'acqua, siano state esse di approvvigionamento, sanitarie o di difesa.

## 1.1 Problematiche connesse all'incremento dell'urbanizzazione e ai cambiamenti climatici in atto in merito alle attuali tecniche di gestione delle acque di pioggia

La crescente complessificazione degli aggregati urbani, l'espansione areale delle città (*sprawl* urbano), la progressiva impermeabilizzazione di porzioni di superficie sempre più grandi, l'aumento dei prelievi idrici, la crescita della popolazione mondiale, con conseguente aumento dei prelievi idrici, e, non ultimi, i fenomeni idrologici estremi legati ai cambiamenti climatici, hanno esteso l'entità e la qualità delle relazioni tra i sistemi urbani e gli ambienti idrici che li sostengono. Tutto ciò, se non affrontato con la necessaria pianificazione, può generare il rischio di compromettere la resilienza degli ecosistemi legati all'acqua, intesa come la capacità dei sistemi idrici naturali di neutralizzare e metabolizzare le pressioni umane e naturali, continuando ad erogare quei servizi ambientali essenziali anche per la sopravvivenza degli stessi insediamenti urbani. La tendenza all'insostenibilità, di cui le città sono un grande moltiplicatore, richiede la messa in campo di soluzioni (tecniche e gestionali) complesse, che portino al superamento della settorializzazione, spesso esistente, tra servizi idrici, difesa idraulica del territorio, e tutela degli ambienti idrici, a favore di strategie politico-gestionali che tengano conto delle forti interconnessioni esistenti.

Dunque, le attuali tecniche in utilizzo nell'ambito del drenaggio urbano sono state concepite con l'unico obiettivo di allontanare il più velocemente

possibile le acque di pioggia ricadenti su tessuti urbani (figura 1.1), secondo un approccio di “hard engineering”.

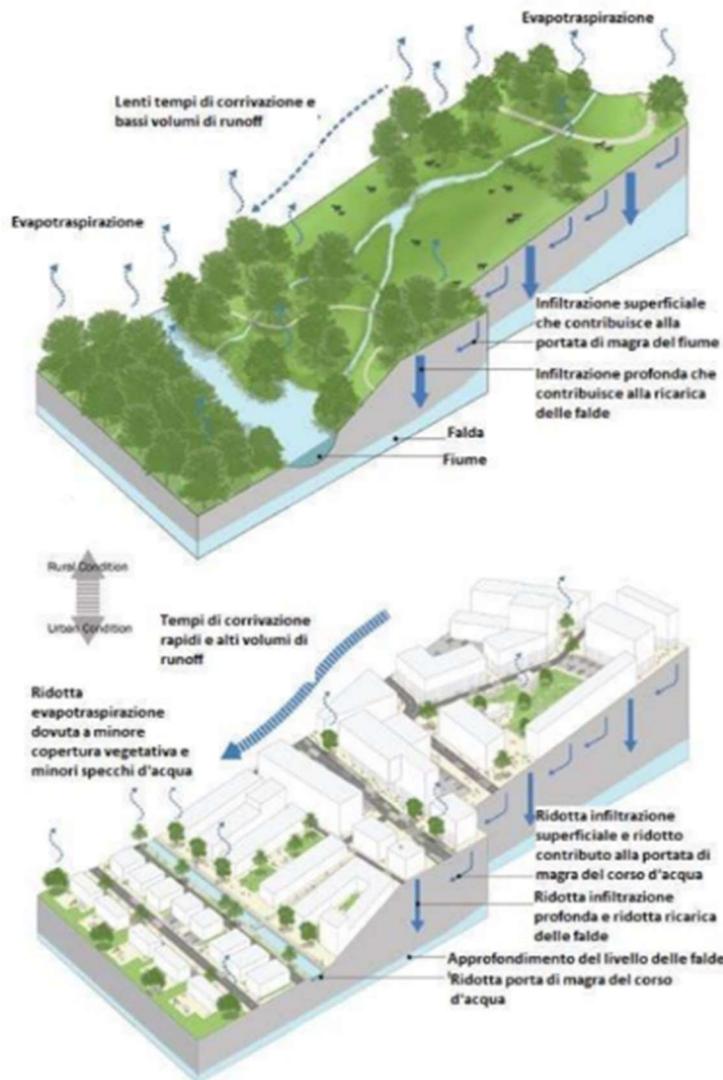


Figura 1.1- Impatto urbanizzazione sul naturale ciclo idrologico su scala di bacino (The SuDS Manual, Woods Ballard et al., 2015)

Tale filosofia, focalizzandosi esclusivamente sull’aspetto idraulico connesso ai sistemi di drenaggio, ha provocato una forte alterazione del naturale processo idrologico proprio delle superfici rurali, andando ad intaccare fortemente quello che il principio di invarianza idraulico.

La progressiva espansione delle aree urbanizzate, e il corrispondente incremento delle aree impermeabili, ha provocato notevoli aumenti delle portate al colmo e dei volumi di piena (figura 1.2), oltre che un completo riassetto delle modalità di smaltimento delle acque meteoriche da parte dei bacini che, prima dell'urbanizzazione, tendevano a privilegiare fenomeni come l'infiltrazione e l'evapotraspirazione, mentre ora è il deflusso superficiale a farla da padrone in termini percentuali (figura 1.3).

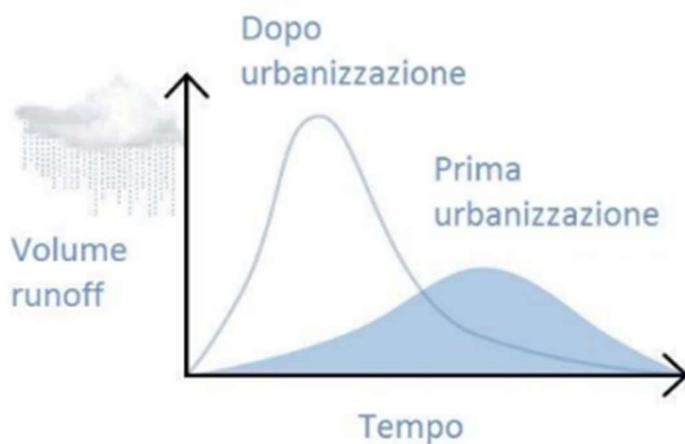


Figura 1.2- Aumento del picco della portata dopo l'urbanizzazione (*Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas. Huber, J., 2010*)



Figura 1.3- Assetto del ciclo idrologico dell'acqua pre- e post-urbanizzazione (*Manuale di drenaggio urbano, Gibelli G., 2015*)

In particolare, ricerche scientifiche hanno evidenziato come un classico approccio di “hard engineering” nella gestione dei sistemi di drenaggio urbano, affiancato dall’aumento della frequenza e dell’intensità di eventi meteorici estremi legati ai cambiamenti climatici già in corso d’opera (figura 1.4), si porti dietro un set di spiacevoli conseguenze, di seguito citate:



*Figura 1.4- Foto di un nubifragio abbattutosi su Torino (Franco Vinetti, 2021)*

- **Allagamenti superficiali:** tali situazioni si presentano, anche per precipitazioni modeste, nel caso in cui le acque di dilavamento non vengano drenate efficacemente (figura 1.5).



*Figura 1.5- Borgo Dora (Torino) allagato in seguito a un evento estremo da record (la Repubblica, giugno 2021)*

- **Allagamenti delle fognature:** si verificano quando le portate ricevute dai collettori fognari superano la capacità drenante degli stessi elementi che, andando in pressione, possono provocare allagamenti (figura 1.6).



*Figura 0-1.6- Tombino esondante durante un evento meteorico sull'isola di Ischia (Francesco Iacono, 2015)*

- **Erosione:** tale fenomeno è legato alle elevate velocità assunte dalle acque grigie provenienti dai collettori fognari. Ciò può provocare mutamenti morfologici del corso d'acqua interessato, con conseguenti effetti sugli habitat acquatici dello stesso.
- **Inquinamento:** è causato dal fatto che le acque piovane dilavano le superfici urbane impermeabili di buona parte delle sostanze inquinanti depositatesi nei periodi secchi, veicolandole verso corpi idrici ricettori. La conseguenza si lega a una compromissione della qualità degli stessi. Tale fenomeno risulta ancor più devastante nel caso di fognature miste, che riversano nei corsi delle acque reflue non trattate per mezzo gli scolmatori di piena.

- **Allagamenti delle aree fluviali:** il drenaggio artificiale delle acque di dilavamento superficiale verso dei corpi idrici ricettori comporta l'aumento della portata di piena dei corsi d'acqua in questione che, per certe condizioni, può generare allagamenti delle aree fluviali a valle delle varie confluenze fognarie (figura 1.7).



*Figura 1.7- Allagamento aree fluviali (Web)*

Tali gravi “mancanze”, che i sistemi fognari tradizionali mostrano, sono dovute anche a vecchie normative poco attente alla tutela dei corpi idrici ricettori.

Poste le doverose premesse, risulta chiara la necessità di recuperare l'intelligenza delle pianificazioni e mettere in campo soluzioni, politiche, tecniche e gestioni, che permettano di connettere positivamente i servizi idrici, la difesa idraulica e la tutela dell'ambiente, garantendo, attraverso la salvaguardia dei sistemi idrici naturali, la fornitura di quei servizi ecosistemici complessi essenziali per il benessere sociale ed economico, cercando, dunque, di integrare l'"hard engineering" con tecniche in grado di rispondere positivamente a tutti i doveri cui un sistema di drenaggio dovrebbe assolvere (figura 1.8).

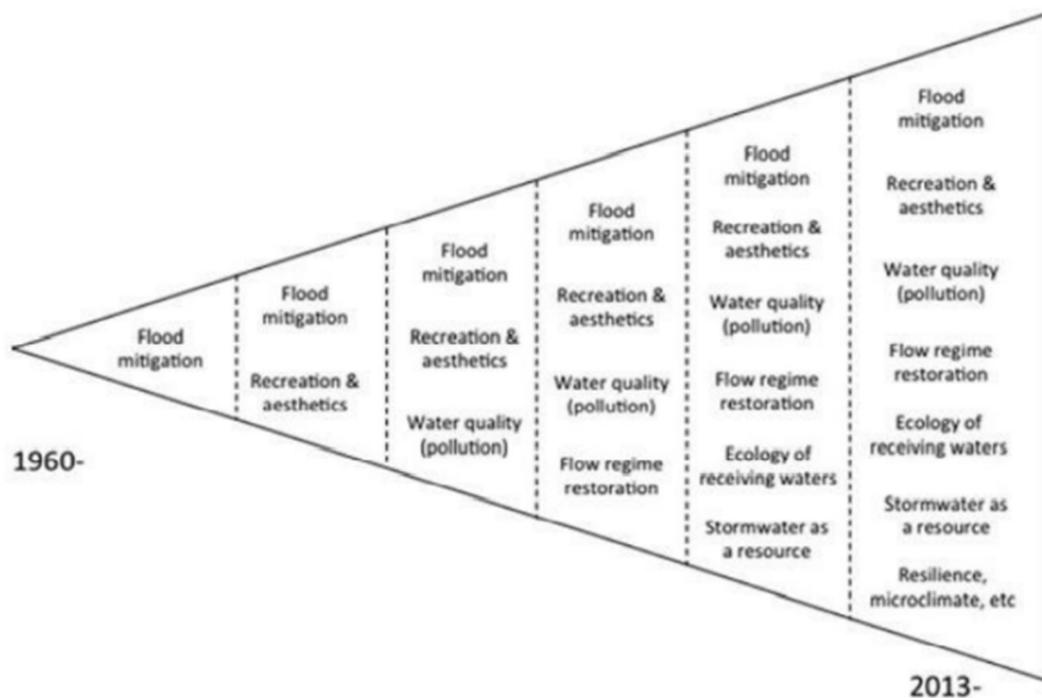


Figura 1.8- Mutamento delle funzionalità richieste a un sistema di drenaggio nel corso degli anni (Fletcher et al., 2014)

# Capitolo 2

## SuDS (Sustainable urban Drainage Systems)

Al fine di mitigare i problemi legati al drenaggio delle acque meteoriche occorsi in seguito a urbanizzazione e cambiamento climatico, sono state introdotte le LID (Low Impact Development), strategie atte al ripristino del naturale ciclo idrologico esistente prima dell'urbanizzazione. Per riferirsi alle LID, sono utilizzati nel mondo diversi appellativi:

- SuDS (Sustainable Drainage Systems)
- WSUD (Water Sensitive Urban Design)
- BMPs (Best Management Practices)
- IUWM (Integrated Urban Water Management)
- GI (Green Infrastructures)
- SQIDs (Stormwater Quality Improvement Devices)

Tramite tali tecniche di drenaggio urbano sostenibile, in piena linea con i concetti della *soft engineering*, si cerca di sviluppare soluzioni ai problemi antropici basandosi sullo sfruttamento dei *servizi ecosistemici*, definiti come i contributi diretti o indiretti degli ecosistemi al benessere umano. Come riportato in *"The SuDS Manual"*, l'adozione di tali pratiche nell'ambito del drenaggio urbano si porta dietro una serie di benefici, riassunti di seguito:

- Proteggere persone e proprietà dall'aumento del rischio causato dall'urbanizzazione;
- Proteggere la qualità delle acque sotterranee e superficiali dal deflusso inquinato;
- Proteggere il naturale regime di flusso di laghi e corsi d'acqua;
- Supportare i naturali habitat locali incoraggiando una maggiore biodiversità;
- Ristabilire umidità del suolo e livelli di falda impoveriti;
- Creare ambienti piacevoli per chi li vive;
- Generare informazione nella gente circa i problemi legati allo sviluppo;
- Garantire un vantaggioso rapporto costi-benefici per quelle infrastrutture che utilizzano *nature-based solutions*.

## 2.1 La filosofia delle LID

La filosofia alla base di tali strategie è quella di replicare, il più possibile, il drenaggio naturale da un sito, andando a riequilibrare il bilancio idrologico e a ridurre il volume di deflusso e il carico inquinante convogliato verso i corpi idrici, passando da uno stadio dopo l'urbanizzazione a uno stadio prima dell'urbanizzazione.

Le LID trattano l'acqua piovana non come un problema, bensì come una risorsa utile al fine di generare biodiversità e piacevolezza estetica all'interno di aree urbanizzate, nonché per la mitigazione di taluni effetti correlati al cambiamento climatico in atto (figura 2.1), andando a trattare la questione del drenaggio secondo un approccio multidisciplinare.



Figura 2.1- Obiettivi SuDS (Gibelli G., 2015. Manuale di drenaggio. Gestione sostenibile delle acque urbane)

### 2.1.1 Gestire quantità d'acqua

Le tradizionali tecniche di drenaggio delle acque meteoriche mirano a un allontanamento delle stesse che sia più veloce possibile. Tale caratteristica si porta dietro una serie di svantaggi che potrebbero mandare in crisi porzioni della rete stessa, oltre che i corpi idrici ricettori. Al fine di prevenire l'affermazione di un simile scenario, risulta opportuno limitare volumi e velocità dei deflussi superficiali provenienti da zone sviluppate. Le unità LID volte alla mitigazione di questi aspetti cercano di raggiungere l'obiettivo di ristabilire un flusso idrologico naturale in linea con i principi di invarianza idraulica. Si mira, dunque, all'ottimizzazione di parametri quali umidità del suolo, altezza della falda, portata di base dei corsi d'acqua e all'incentivazione di processi come evapotraspirazione e infiltrazione. Controllare il picco di portata risulta fondamentale per prevenire allagamenti ed erosione dei corsi d'acqua e, come mostrato in figura 2.2, il drenaggio urbano sostenibile mira ad un'attenuazione della stessa, portandola a un valore circa pari a quello che si avrebbe nel caso di terreno

incontaminato. A differenza di quest'ultimo scenario, essendo meno importanti le percentuali di acqua infiltrata o evapotraspirata, i volumi di deflusso superficiale risultano maggiori, per cui il picco di piena si protrae per un lasso di tempo più lungo.

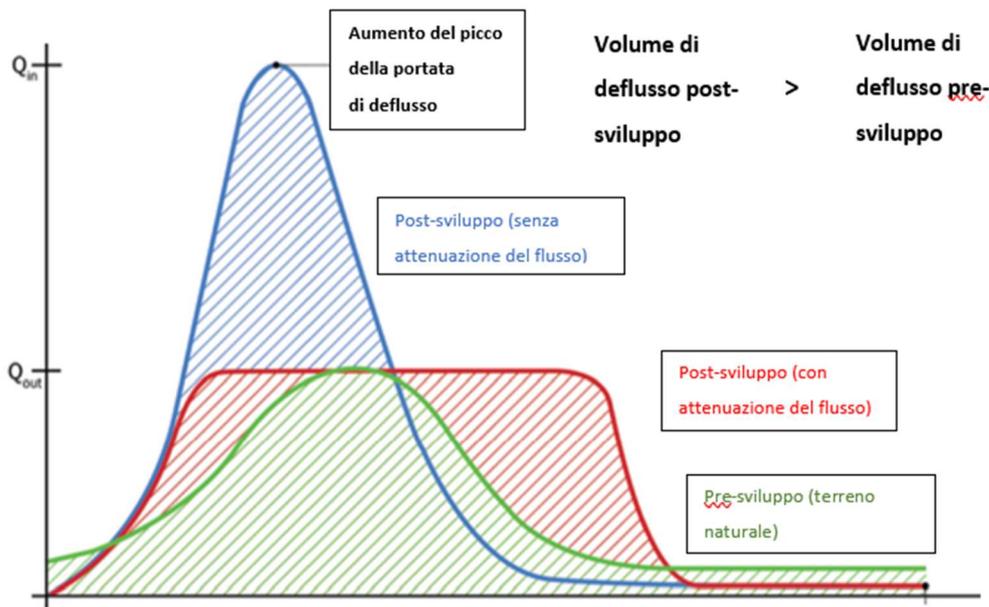


Figura 0-1.2- Confronto portate di picco e volumi di deflusso nei casi di terreno incontaminato e area sviluppata (con e senza attenuazione del flusso) (The SuDS manual, 2015)

## 2.1.2 Migliorare qualità dell'acqua

Un'ulteriore falla imputabile alle attuali tecniche di drenaggio è costituita dal fatto che le reti a cui siamo abituati, per non destabilizzare il flusso idrico nei collettori ed evitare allagamenti in prossimità dei pozzetti di giunzione, sono dotate di scolmatori di piena. Tali elementi sono collocati in modo da avere una data elevazione rispetto al fondo del nodo di confluenza e il loro compito è quello di alleggerire il carico all'interno delle tubazioni andando a smaltire il volume idrico che raggiunge un'altezza designata inviandolo

direttamente al corso d'acqua, senza la fondamentale tappa rappresentata dal depuratore. Tale aspetto, pur essendo pensato per evitare sovraccarico all'interno della rete, può indurre a notevoli immissioni di inquinanti all'interno dei corpi idrici ricettori.

Le tecniche di drenaggio urbano sostenibile risultano molto prestanti sotto l'aspetto della riduzione del carico di inquinanti associato a un certo flusso idrico. Infatti, la pioggia che dilava le superfici impermeabili, di cui il tessuto urbano è molto ricco, se incanalata verso queste unità LID, si ritrova a dover superare strati di terreno da cui parte del carico inquinante verrà trattenuta, generando un flusso in uscita molto più puro e povero di sostanze nocive. Tale meccanismo, ovviamente, può portare all'intasamento del terreno atto a filtrare l'acqua, per cui risulta necessaria una manutenzione periodica di tali unità. Inoltre, la vegetazione ospitata all'interno delle unità LID, spesso, ha già di suo delle proprietà *fitodepuratrici*, perciò, oltre ad assorbire l'acqua necessaria al proprio ciclo vitale, tende ad assimilare anche altre sostanze contribuendo a ridurre il carico inquinante in uscita dall'unità. Ad esempio, alcune comuni specie di graminacee riescono a trattenere una certa percentuale di metalli pesanti presenti nell'atmosfera di tante città. Anche specie note come la canapa e i girasoli presentano proprietà utili per bonificare i terreni, rimuovendo inquinanti sia organici che inorganici.

La figura 2.3, che mostra la sostanziale differenza processi di trattamento degli inquinanti tra *hard* (che predilige processi puramente meccanici) e *soft engineering* (che promuove processi biologici), riassume alcuni dei concetti appena esplicitati.

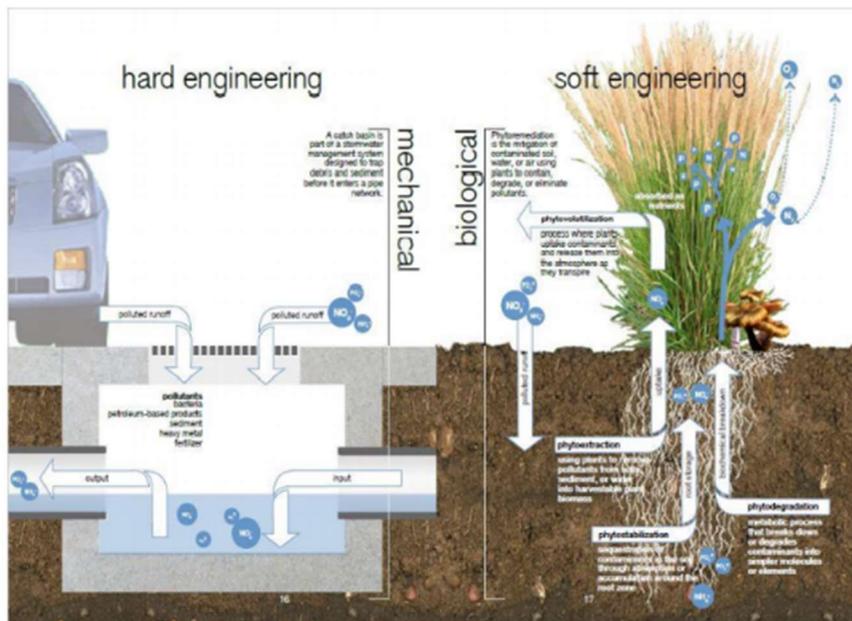


Figura 2.3- Differenza nei processi di trattamento degli inquinanti tra hard engineering e soft engineering (Huber J., 2010, *Low Impact Development: a design manual for urban areas*)

### 2.1.3 Generare amenità

Oltre alle funzioni di gestione della quantità e della qualità dell'acqua, l'installazione di unità LID concorre anche alla generazione di un ambiente che sia piacevole e armonioso per chi lo vive. La presenza di *infrastrutture verdi e blu*, infatti, si porta dietro diversi vantaggi sotto questo punto di vista. Per esempio, si va ad accrescere la valentia estetica e ricreativa dell'area interessata, favorendo, poi, benessere e salute di chi ci vive a contatto.

### 2.1.4 Incentivare biodiversità

Un argomento sempre più scottante e a cui innumerevoli associazioni fanno riferimento a livello mondiale riguarda la salvaguardia di ambienti in cui numerose specie animali e vegetali ritrovano un habitat ideale. Il crescente sviluppo urbano e l'incremento di aree impermeabili, ha portato a una frammentazione del territorio incontaminato a cui tante specie stentano ad adattarsi. L'introduzione di *unità e infrastrutture verdi e blu* aiuta a rigenerare ambienti ideali e confortevoli per tante specie faunistiche e floristiche, che trovano in essi habitat ideali e canali di collegamento con le sempre più rare aree incontaminate.

## 2.2 Descrizione delle varie unità LID

Tale sezione mira a una descrizione delle unità LID più diffuse, con particolare attenzione per *tetti verdi e giardini pluviali*, di maggiore interesse nell'ambito del presente documento.

### 2.2.1 Tetti verdi

Essi sono coperture ospitanti specie vegetali. Sono pensati per adempiere a diversi scopi: ridurre il volume di runoff attenuandone il flusso, fungere da coibente per la copertura che lo ospita, mitigare le elevate temperature estive percepite in ambiente urbano grazie all'attività di evapotraspirazione

delle piante che va a raffrescare l'aria circostante, generare biodiversità e valore estetico, migliorare la qualità di acque e aria.

Nella pratica, possono esistere di due tipi: intensivi ed estensivi. I **tetti verdi estensivi** (figura 2.4) ospitano specie vegetali poco ingombranti, motivo per cui hanno un peso relativamente basso, che va dai 75 ai 250 kg/m<sup>2</sup> (in condizioni di massima saturazione idrica). Sono soluzioni che solitamente si adottano nel caso di coperture non calpestabili e necessitano di scarsa manutenzione (circa una o due volte all'anno).



Figura 2.4- Immagine di un tetto verde estensivo (Web)

I **tetti verdi intensivi** (figura 2.5) sono dei veri e propri giardini sul tetto e, come tali, necessitano una manutenzione molto frequente, anche quotidiana. A terreno saturo, presentano un peso variabile tra i 400 e i 750 kg/m<sup>2</sup>. Risultano molto piacevoli dal punto di vista estetico e, nella maggior parte dei casi, sono accessibili.



*Figura 2.5- Tetto verde intensivo (Web)*

Tali unità sono costituite da vari strati, come riportati in figura 2.6. La pendenza della copertura ospitante deve essere opportunamente compresa tra lo 0,5% e il 5%. Il limite inferiore di tale range serve per evitare ristagni prolungati dell'acqua, mentre il limite superiore è necessario per evitare un veloce allontanamento del volume di runoff.

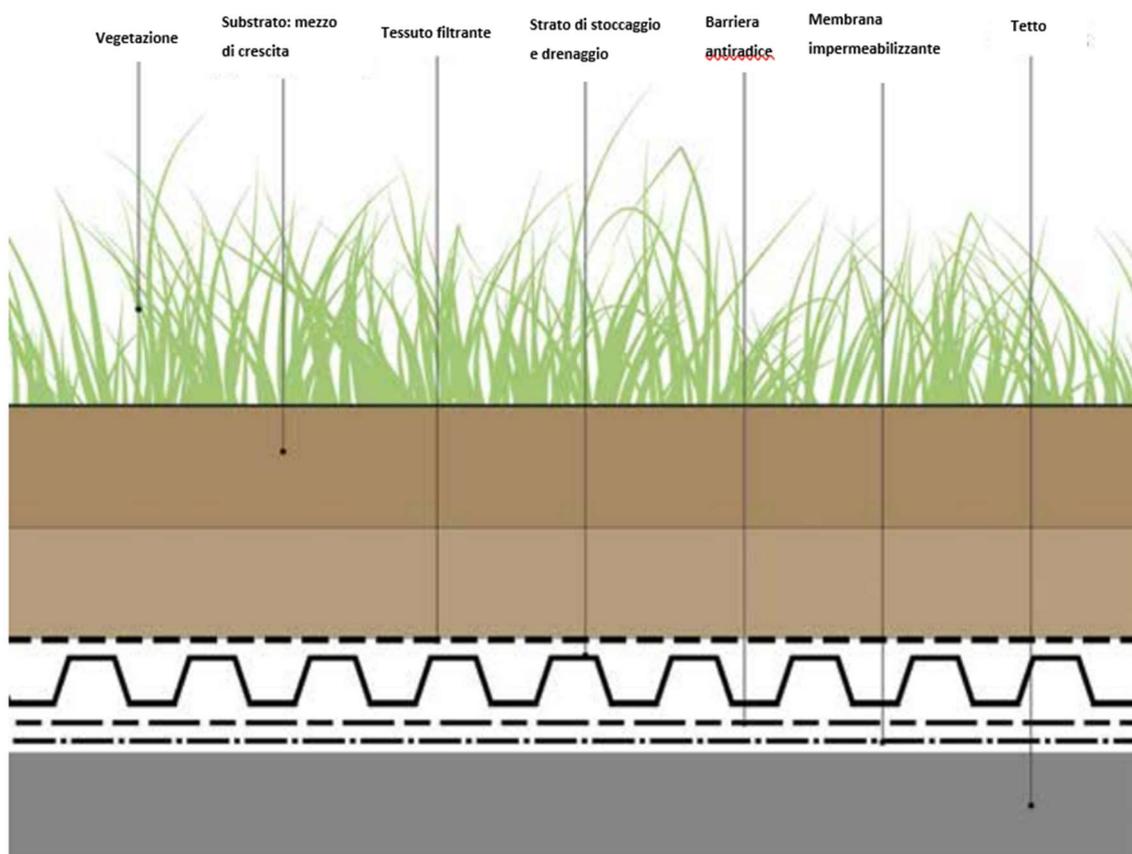


Figura 2.6- Stratigrafia Green roof (The SuDS Manual, 2015)

Ciascun layer, ovviamente, svolge funzioni diverse:

- Lo **strato di terreno**, avente spessore variabile in base alle caratteristiche della **vegetazione** da ospitare, ha il compito di nutrire le piante messe a dimora su di esso.
- Lo **strato di stoccaggio e drenaggio** è solitamente costituito da un tappetino prefabbricato che ha il compito di accogliere e allontanare l'acqua filtrata dal substrato. È separato dal terreno sovrastante da un **tessuto filtrante**.
- La **barriera antiradice** ha il compito di attenuare il carico degli strati superiori e proteggere la sottostante **membrana**

**impermeabilizzante** da eventuali danneggiamenti, che porterebbero a conseguenze spiacevoli per il solaio della struttura ospitante.

I **green roofs**, sono in grado di ridurre il coefficiente di runoff anche del 100% per precipitazioni deboli, ma una volta raggiunta la saturazione si comportano come un normale tetto. Inoltre, uno studio dell'Università di Karlsruhe ha dimostrato che l'acqua piovana trattata dai tetti verdi risulta avere un contenuto di rame, zinco, cadmio e piombo ridotto del 92-99%.

### 2.1.2 Aree di bioritenzione (rain garden)

Le aree di bioritenzione sono delle unità che assolvono a diversi scopi: riduzione del flusso idrico grazie all'agevolazione di fenomeni quali evapotraspirazione ed infiltrazione, aumento della biodiversità e dell'amenità, trattamento e depurazione delle acque ricevute.

In figura 2.7 si riporta un esistente *rain garden*.



Figura 2.7- Immagine di un rain garden (Web)

In figura 2.8, invece, si mostrano le varie componenti necessarie per un *rain garden*.

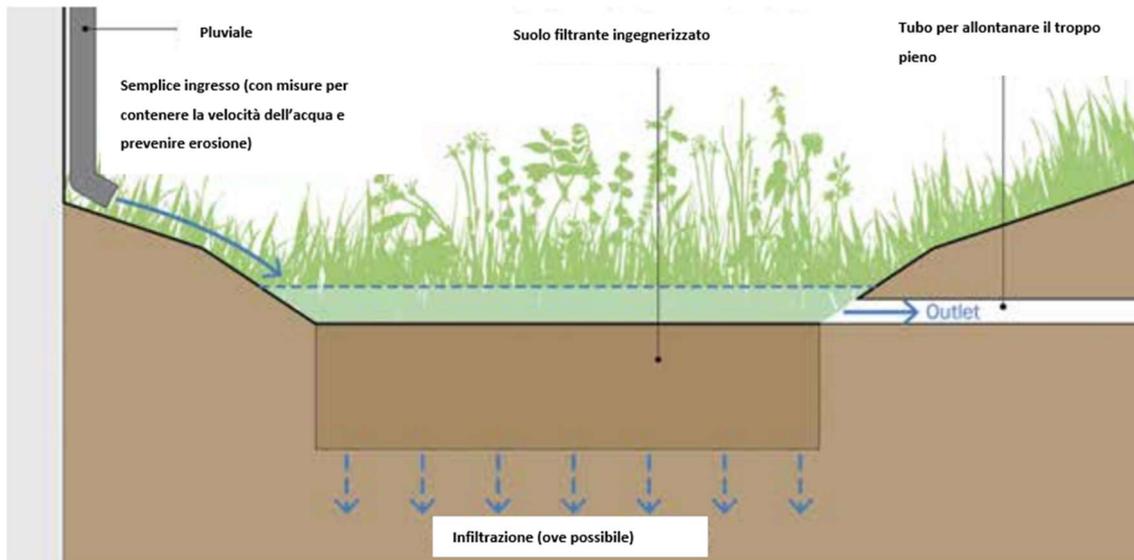


Figura 2.8- Componenti rain garden (The SuDS Manual, 2015)

Dall'alto verso il basso, esso è composto dai seguenti strati:

- Uno strato **vegetativo** atto al rallentamento dell'acqua in ingresso, al fine di evitare erosione;
- Un'**area di ristagno** che è una fascia alta qualche centimetro che ha il compito di accumulare l'acqua e farla infiltrare negli strati sottostanti;
- Uno **strato di accumulo e drenaggio** che fornisce nutrimento alla vegetazione e che ha proprietà fitodepurative. Il volume trattato da tale strato può essere infiltrato nel sottostante terreno o, quando non possibile, viene attirato da dreni forati e allontanato verso la rete di drenaggio.

A livello prestazionale, un *rain garden* è molto più efficiente di un *tetto verde* per quanto riguarda il volume idrico ritenuto e infiltrato. Riesce a mantenere il proprio coefficiente di runoff prossimo allo zero anche per precipitazioni di una certa entità. Inoltre, depura l'acqua trattata riducendone il contenuto di inquinanti di circa il 30%.

### 2.1.3 Altre unità

Tra le svariate unità LID a disposizione, alcune vengono elencate e brevemente descritte di seguito:

- ***Serbatoi di stoccaggio di attenuazione:*** sono delle unità atte allo stoccaggio dell'acqua piovana. Hanno la funzione di attenuare il flusso di piena associato a un evento meteorico, allontanando verso il sistema fognario o riutilizzando il volume stoccato in maniera controllata.
- ***Pavimentazioni permeabili:*** sono delle pavimentazioni che, oltre a svolgere le ordinarie funzioni richieste, consentono l'infiltrazione e il temporaneo stoccaggio della stessa, successivamente infiltrata nel sottostante terreno o drenata verso nodi fognari situati più a valle.
- ***Trincee infiltranti:*** sono dei canali inerbiti che hanno il compito di convogliare l'acqua piovana. La presenza di erba sul fondo rallenta il flusso promuovendo fenomeni quali l'evapotraspirazione, l'infiltrazione e la sedimentazione. Presentano caratteristiche ottimali per rimpiazzare le tradizionali reti di drenaggio di strade, parcheggi o sentieri.

## 2.3 Indicatori d’impatto per le unità LID

La vasta gamma di unità LID e *nature-based solutions* a disposizione, e la possibilità di utilizzarle per rispondere alle più disparate richieste progettuali, porta alla necessità di uniformare le valutazioni degli impatti e delle performance associate a tali soluzioni. A tale scopo, ci si serve di indicatori che siano attendibili e rilevanti per tutte le aree geografiche e le scale di applicazione in cui queste unità si trovano ad operare. L’esperienza maturata nel campo delle *nature-based solutions* ha portato alla definizione di una serie di indicatori d’impatto che rispondono ai principi di essere scientificamente validi, diretti e pratici, e di basarsi su un approccio transdisciplinare. In particolare, in funzione dei compiti che le unità devono assolvere (gestire la quantità di acqua, migliorarne la qualità, generare amenità o biodiversità, ecc.) ci si può riferire a diverse tipologie di indici.

### 2.3.1 Indicatori di quantità

Per quanto riguarda la gestione della quantità dei flussi idrici, alcuni indicatori significativi vengono elencati di seguito:

- Tasso e capacità di infiltrazione;
- Tasso di evapotraspirazione;
- Variazione del picco di portata;
- Riduzione e ritardo del picco di flusso;
- Coefficiente di runoff della superficie per diversi tipi di evento meteorico;
- Percentuale di precipitazione trattata;

- Capacità di stoccaggio idrico;
- Disponibilità idrica per scopi irrigativi.

### 2.3.2 Indicatori di qualità di acqua

Per quanto riguarda la qualità di acqua, tra i principali indicatori significativi si trovano:

- Concentrazione di solido sospeso;
- Concentrazione di fosforo e nitrogeno;
- Concentrazione di metalli;
- Indice di qualità morfologica di un corso;
- Stato ecologico generale della superficie dei corsi d'acqua.

### 2.3.3 Indicatori per il rischio naturale, per la resilienza climatica e per la qualità dell'aria

Infine, tra i possibili indicatori d'impatto per la valutazione dei rischi naturali, della resilienza climatica e della qualità dell'aria, vi sono:

- Quantità di carbonio catturata dalla vegetazione;
- Media dei valori mensili di temperatura minima e massima;
- Energia risparmiata grazie alla presenza di unità LID;
- Presenza delle isole di calore;
- Stima della riduzione delle temperature massime estive;
- Aree e popolazione potenzialmente esposta al rischio;
- Rischio di erosione.

## Capitolo 3

# Software SWMM (Storm Water Management Model)

Lo strumento scelto per la costruzione di un modello in grado di simulare le prestazioni idrauliche e idrologiche del sistema è il software SWMM (Storm Water Management Model), prodotto e rilasciato da EPA (Environmental Protection Agency), e scaricabile tramite il seguente link:

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

Esso è un modello fisicamente basato, ampiamente utilizzato in tutto il mondo per la pianificazione, l'analisi e la progettazione relative al deflusso delle acque piovane, alle fognature e ad altri sistemi di drenaggio. Tale modello, sviluppato per la prima volta nel 1971, simula dinamicamente le precipitazioni piovose (specialmente in aree urbane) ricadenti in una certa zona, al fine di captare quantità e qualità del deflusso in uscita dallo stesso bacino.



Figura 3.1- Rappresentazione delle componenti che regolano il ciclo idrologico in ambiente urbano (SWMM's manual)

La componente di deflusso di SWMM opera su sottobacini, che possono essere permeabili o impermeabili e contemplare depressioni di stoccaggio o meno, che ricevono precipitazioni e generano deflusso e carichi inquinanti. La porzione di routing di SWMM trasporta questo deflusso attraverso un sistema di tubi, canali, dispositivi di stoccaggio/trattamento, pompe, e regolatori. SWMM traccia la quantità e la qualità del deflusso generato all'interno di ogni sottobacino, valutandone portata, profondità di flusso e qualità dell'acqua in ogni tubo e canale durante un periodo di simulazione composto da più fasi temporali. SWMM, nell'ambito del bilancio idrologico, può contare sulla possibilità di considerare diversi processi, quali:

- Pioggia variabile nel tempo;
- Evapotraspirazione;
- Infiltrazione;
- Scambio di acqua sistema di drenaggio/falda;

- Accumulo e scioglimento di neve;
- cattura e ritenzione di precipitazioni/deflusso con vari tipi di pratiche di sviluppo a basso impatto (LID).

Un'ulteriore potenzialità è data dalla possibilità di valutare la qualità delle acque defluite, tramite stime circa l'accumulo e la propagazione di inquinanti (una volta che questi ultimi sono stati definiti).

### 3.1 Modello concettuale

Il software SWMM modella un sistema di drenaggio come una serie flussi idrici tra una serie di comparti ambientali (in figura 3.2 si riporta una graficizzazione del modello concettuale di base), di cui di seguito si elencano le caratteristiche di principale interesse:

- **Comparto atmosfera:** genera precipitazioni sotto forma di pioggia o neve e sostanze inquinanti (se definite). In SWMM si materializza tramite l'oggetto "Rain gage" e il suo flusso è trasferito al comparto rappresentante la superficie terrestre.
- **Comparto superficie terreno:** è rappresentato da uno o più "Subcatchments". Riceve le precipitazioni provenienti dal comparto atmosfera e le smaltisce inviandole tramite infiltrazione al comparto delle acque sotterranee, scorrimento superficiale alla sezione relativa al trasporto o ancora tramite la definizione di fenomeni di evapotraspirazione.
- **Comparto acque sotterranee:** si introduce nel modello SWMM utilizzando l'oggetto "Acquifer". Riceve l'infiltrazione generata dal

terreno superficiale trasferendone una porzione al comparto relativo al trasporto.

- **Comparto trasporto:** riceve afflussi sottoforma di flusso superficiale, dall'interflusso di acque sotterranee, dai flussi sanitari in tempo secco o da idrografi che l'utente può definire. Contiene una rete di elementi di trasporto (tubi, canali, regolatori e pompe) e unità di stoccaggio/trattamento in grado di indirizzare il flusso ricevuto verso gli scarichi e gli impianti di trattamento. Si concretizza in SWMM tramite l'introduzione di una serie di oggetti rappresentanti nodi e condotte.

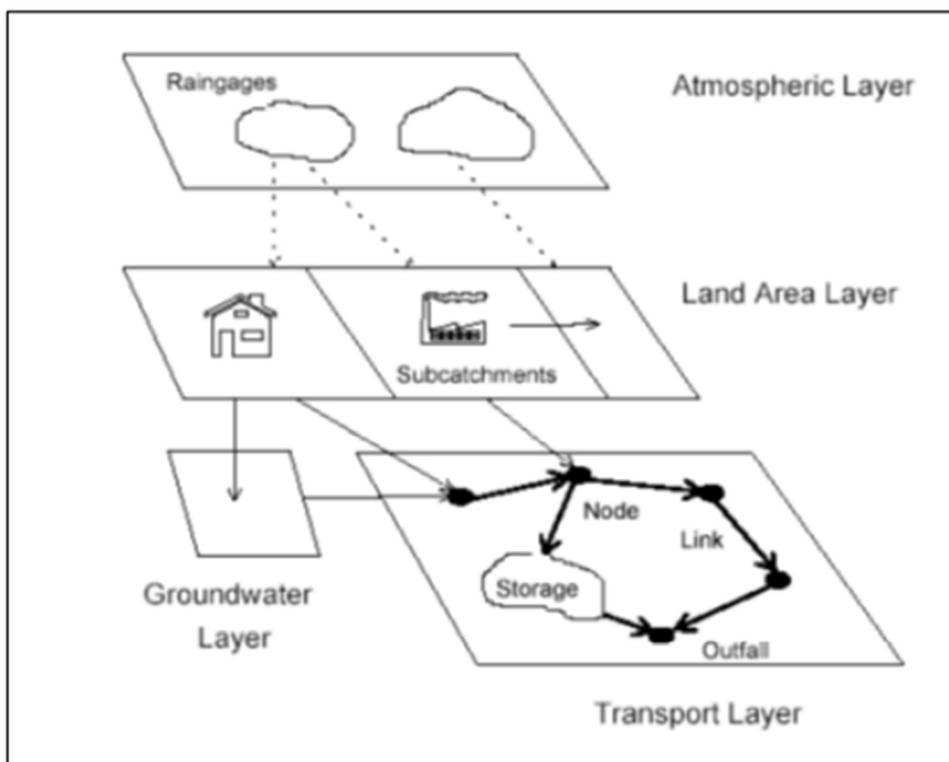


Figura 3.2- Modello concettuale di un sistema di drenaggio in SWMM (Baratti E., 2009)

Si riporta, in figura 3.3, un modello base creato su SWMM, in modo che sia più chiaro lo schema concettuale utilizzato dal software durante una simulazione:

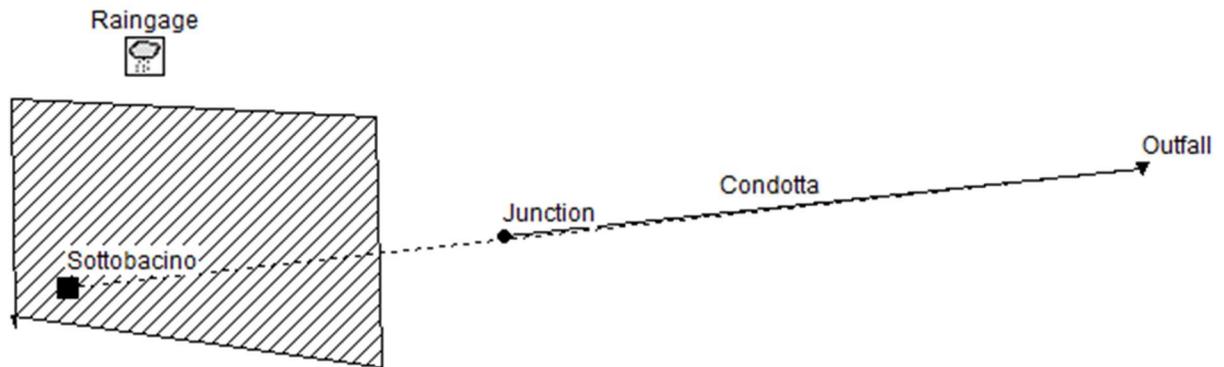


Figura 3.3- Rappresentazione modello base creato in SWMM (produzione autonoma)

Lo schema appena rappresentato consta di un pluviometro ("rain gage") che contiene il tipo di precipitazione e che è opportunamente collegato al sottobacino, elemento in cui si sviluppa la prima parte del flusso (deflusso, infiltrazione, ecc.); il sottobacino in questione è collegato in modo fittizio a un pozzetto ("junction") in cui ricade tutto il deflusso prodotto dal sottobacino. Infine, a partire da tale pozzetto, si sviluppa la componente di propagazione del flusso, che dall'elemento appena citato si propaga tramite una condotta fino alla sezione di chiusura. Ovviamente, tale semplicissimo schema si riporta solo a titolo di esempio, ma possono essere costruiti modelli ben più articolati e complessi.

## 3.2 Introduzione in SWMM degli elementi della rete di drenaggio

In questa sezione verranno descritti gli oggetti (alcuni dei quali sono rappresentati in figura 3.3), e le relative caratteristiche, che è possibile utilizzare all'atto della progettazione una rete di drenaggio in SWMM. Nella fase di progettazione, è necessario introdurre in SWMM le caratteristiche relative agli eventi meteorici, al territorio e agli elementi della rete di drenaggio. Facendo riferimento all'interfaccia del software, visibile in figura 3.4, sono tre i moduli da consultare al fine di inserire gli oggetti costituenti il sistema di drenaggio pensato.

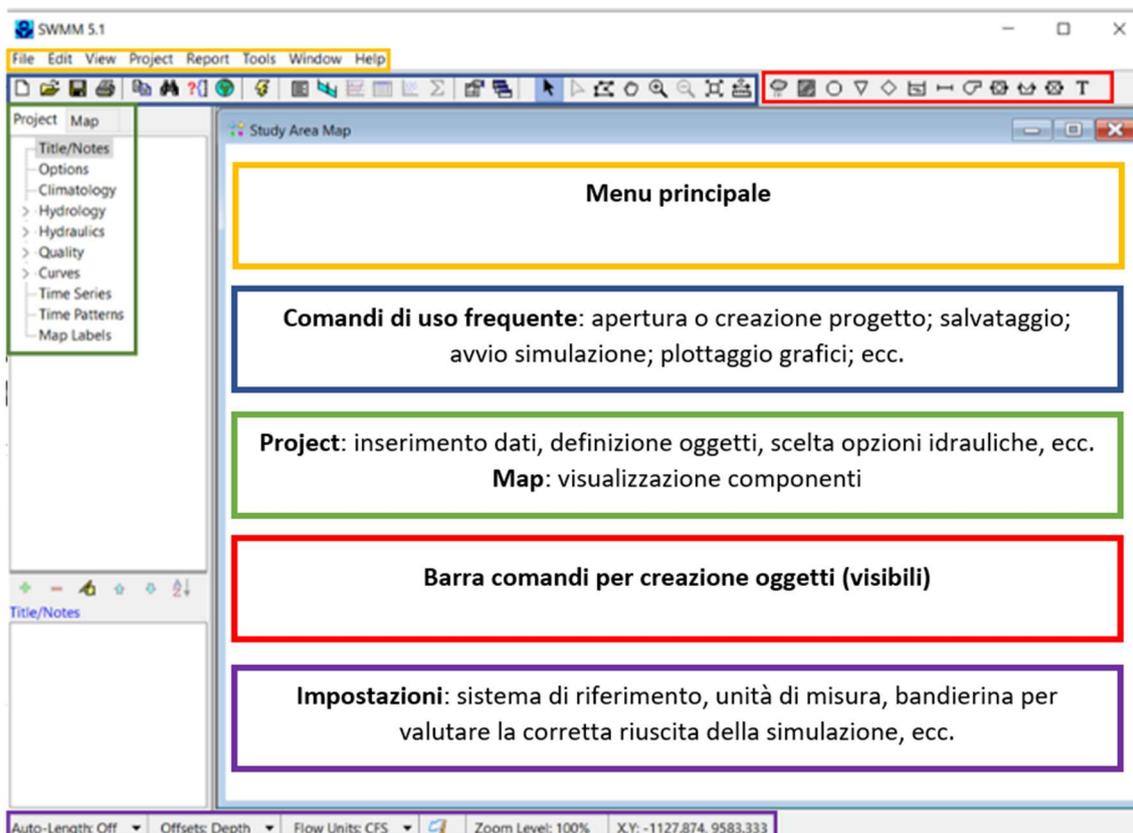


Figura 3.4- Interfaccia di SWMM integrata da breve descrizione delle varie sezioni (produzione autonoma)

### 3.2.1 Modulo idrologico (Hydrology)

In tale modulo si vanno a delineare le caratteristiche dei vari sottobacini in termini geometrici e idrologici, si definisce un pluviometro (che è il primo dato di input che entra in gioco durante la simulazione). I principali elementi che è possibile inserire tramite tale sezione sono di seguito elencati.

- **Rain gages (pluviometri)**  : contengono i dati relativi alle precipitazioni da associare ai vari sottobacini. Tali dati possono essere inseriti da file esterni o tramite serie temporali definite direttamente dall'utilizzatore. In particolare, è possibile settare le seguenti proprietà dei pluviometri:
  - Tipologia dei dati delle precipitazioni. Si possono inserire dati di pioggia riferendosi a intensità, volume e volume cumulato.
  - Intervallo di tempo di registrazione, che può essere scelto tra un range di valori compresi tra un minuto e 24 ore.
  - Fonte dei dati (serie temporale o file esterno).
  - Nome della fonte.
- **Subcatchments (sottobacini)**  : sono porzioni di territorio che ricevono la precipitazione e, tramite la definizione di opportuni elementi, la indirizzano verso certe destinazioni (evaporazione, nel terreno come infiltrazione, nella rete di drenaggio come deflusso). Per la definizione dei sottobacini, oltre all'assegnazione di un ID, è necessario settare parametri geometrici come area, pendenza e larghezza di flusso, associargli un "rain gage" da cui ricevere le precipitazioni e un punto di scarico, che può essere un nodo della rete

di drenaggio o un altro sottobacino. Per ciascun “Subcatchment” è possibile definire le % di area impermeabile e permeabile, con relative % di area con presenza di depressioni d’accumulo, e relativi numeri di Manning. Per quanto riguarda le porzioni permeabili di un sottobacino, esse consentono l’infiltrazione nel terreno sottostante, che può essere trattata scegliendo tra i modelli di Horton, Horton modificato, Green-Ampt, Green-Ampt modificato e il metodo del Curve Number. Vi è poi l’opportunità di modellare l’interflusso tra falda sotterranea e nodi della rete di drenaggio, andando ad associare al sottobacino un “Groundwater” da determinare. Possono essere contemplati degli inquinanti dovuti al dilavamento della superficie del sottobacino, assegnando allo stesso un “Land use”. Infine, risulta interessante la potenzialità di poter associare delle unità LID (tetti verdi, giardini della pioggia, pavimentazioni permeabili, celle di bioritenzione, ecc.) al sottobacino, in modo che si possa simulare un drenaggio sostenibile e valutarne l’efficienza idrologica in maniera molto rapida e facilmente intuibile.

### 3.2.2 Modulo idraulico (Hydraulics)

Tale sezione si riferisce alla parte puramente idraulica del sistema, rappresentata dalla rete di drenaggio. Essa permette di impostare i parametri idraulici e geometri degli elementi costituenti la rete idraulica, di seguito elencati:

- **Junctions (giunzioni)**  : tali elementi rappresentano dei nodi (pozzetti) che collegano i collettori. Si definiscono tramite parametri

quali: max depth (massima profondità che l'acqua può avere al suo interno), invert elevation (elevazione del fondo rispetto all'origine del sistema di riferimento dell'altezza), eventuali dati di afflusso esterno, superficie interessata da un eventuale allagamento dovuto al trabocco della giunzione.

- **Outfalls (Scarichi)** ▽ : rappresentano i nodi terminali della rete e sono collegati a una condotta. Oltre alla necessità di impostare valore di "invert elevation", è possibile scegliere la destinazione finale del flusso in uscita dallo stesso, e le condizioni al contorno del flusso in uscita.
- **Flow Dividers (Separatori di portata)** ◇ : sono dei nodi della rete di drenaggio che consentono di separare il flusso in arrivo in un modo prescritto. Essi assolvono a tale compito solo nel caso di utilizzo dei modelli dell'onda statica o cinematica, mentre si comportano come normali giunzioni nel caso di modellazione con l'onda dinamica. In funzione delle modalità con cui il flusso viene deviato, è possibile scegliere tra 4 tipologie di deviatori di flusso: "cutoff divider" (che devia tutto l'afflusso che eccede un valore predefinito), "overflow divider" (che devia tutto l'afflusso al di sopra della capacità di flusso del condotto non deviato), "tabular divider" (che utilizza una tabella che esprime il flusso deviato in funzione dell'afflusso totale) e "weir divider" (che utilizza l'equazione [1] per calcolare il flusso deviato).

$$Q_{div} = C_w (f H_w)^{1.5} \quad [1]$$

In cui,  $C_w$  è il coefficiente di sbarramento,  $H_w$  rappresenta l'altezza di sbarramento ed  $f$  è una grandezza calcolata come riportato nell'equazione [2]:

$$f = \frac{(Q_{in} - Q_{min})}{(Q_{max} - Q_{min})} \quad [2]$$

Con  $Q_{in}$  che è la portata entrante nel deviatore,  $Q_{min}$  che è il valore minimo di portata per cui il deviatore entra in gioco e  $Q_{max}$  che è, invece, il valore di massima portata, calcolata come segue:

$$Q_{max} = C_w H_w^{1.5} \quad [3]$$

- **Storage Units (unità di stoccaggio)**  : sono nodi della rete di drenaggio che consentono l'accumulo dell'acqua. Fisicamente possono rappresentare piccoli serbatoi come anche grandi laghi. Le sue proprietà possono essere definite mediante funzioni o tabelle in cui sono messe in relazione area di una certa sezione e altezza dell'unità di stoccaggio. Oltre che l'ingresso l'accumulo dell'acqua, ne consentono uscita sottoforma di deflusso, l'evaporazione e l'infiltrazione. Per definirli è necessario inserirne i valori di "invert elevation" e "max depth".

- **Conduits (condotte)**  : sono collegamenti (condotte o canali) che trasportano il flusso idrico da un nodo all'altro del sistema di drenaggio. Per definirle è necessario settare i parametri di lunghezza, numero di Manning, profondità massima del flusso idrico al loro interno, gli offsets di entrata e di uscita, nodo d'ingresso e nodo d'uscita. A livello geometrico, è possibile scegliere tra una vasta gamma di forme proposte dal software (riportate in figura 3.5).

Per il calcolo della portata nei condotti, il software utilizza l'equazione di *Manning*:

$$Q = \frac{1.49}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [4]$$

In cui:  $Q$  è la portata circolante nella condotta,  $A$  è l'area della sezione trasversale della stessa,  $R$  rappresenta il raggio idraulico,  $S$  è la pendenza ed  $n$  è il coefficiente di Manning.

Name	Parameters	Shape	Name	Parameters	Shape
Circular	Full Height		Circular Force Main	Full Height, Roughness	
Filled Circular	Full Height, Filled Depth		Rectangular - Closed	Full Height, Width	
Rectangular - Open	Full Height, Width		Trapezoidal	Full Height, Base Width, Side Slopes	
Triangular	Full Height, Top Width		Horizontal Ellipse	Full Height, Max. Width	
Vertical Ellipse	Full Height, Max. Width		Arch	Full Height, Max. Width	
Parabolic	Full Height, Top Width		Power	Full Height, Top Width, Exponent	
Rectangular-Triangular	Full Height, Top Width, Triangle Height		Rectangular-Round	Full Height, Top Width, Bottom Radius	
Modified Baskethandle	Full Height, Bottom Width, Top Radius		Egg	Full Height	
Horseshoe	Full Height		Gothic	Full Height	
Catenary	Full Height		Semi-Elliptical	Full Height	
Baskethandle	Full Height		Semi-Circular	Full Height	
Irregular Natural Channel	Transect Coordinates		Custom Closed Shape	Full Height, Shape Curve Coordinates	

Figura 3.5- Forme possibili da adottare per la sezione trasversale delle condotte (SWMM's manual, 2015)

- **Pumps (pompe)**  : sono dei collegamenti da utilizzare per spostare l'acqua da un punto a un altro avente quota maggiore. SWMM contempla 5 tipi diversi di funzionamento delle pompe.

- **Orifices (orifici)**  : vengono utilizzati per modellare le strutture di scarico e di deviazione nei sistemi di drenaggio, che sono tipicamente aperture nella parete di un tombino o di un'unità di stoccaggio. Nel programma fungono da collegamento tra due nodi e possono avere forma rettangolare o circolare e essere posizionati in basso o a lato del nodo a monte. Il flusso attraverso un orificio completamente aperto è calcolato come dalla seguente relazione:

$$Q = CA\sqrt{2gh} \quad [5]$$

Dove:  $C$  è il coefficiente di scarico,  $A$  è l'area della sezione di apertura dello scarico,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $h$  rappresenta la differenza di carico tra il nodo di valle e quello di monte.

- **Weirs (sbarramenti)**  : sono unità che permettono di modellare gli scolmatori/sbarramenti presenti in un sistema di drenaggio (in un pozzetto o lungo le sponde di un canale) o nelle unità di stoccaggio. Rappresentando un collegamento tra due nodi del sistema, è possibile inserire una valvola che impedisca le inversioni di flusso. SWMM propone 5 tipi diversi di sbarramenti, ciascuno basato su relazioni diverse per il calcolo della portata.
- **Outlets (uscite)**  : sono dispositivi di controllo del flusso generalmente utilizzati per controllare i flussi in uscita dalle unità di

stoccaggio. In SWMM sono rappresentati come collegamento tra due nodi.

### 3.2.3 Modulo qualità (quality)

Il modulo qualità permette di inserire nella rete degli inquinanti, valutandone l'origine e la propagazione all'interno della rete. Tale sezione consta di due comandi principali:

- **Pollulants (inquinanti):** tale comando permette di simulare l'origine degli inquinanti e il loro percorso di ciascuno di essi all'interno della rete. Per definirli è necessario specificare unità di misura, concentrazione nelle precipitazioni, nelle acque di deflusso superficiale e in quelle sotterranee. Il loro accumulo e trasporto risulta essere una funzione degli usi del suolo.
- **Land Uses (usi del suolo):** tale opzione consente di associare determinate caratteristiche a un certo sottobacino, in funzione della destinazione d'uso a cui lo stesso è soggetto (residenziale, commerciale, industriale, non sviluppato, ecc.).

### 3.2.4 Moduli minori

In aggiunta ai moduli principali appena elencati e descritti, SWMM ne propone degli altri che vanno ad aumentare le possibilità di una modellazione dettagliata e precisa.

- **Climatology (climatologia):** tale sezione consente di considerare fenomeni e variabili quali temperatura, evaporazione, scioglimento neve, e di settarne i valori sia come costanti che variabili.
- **Curves (curve):** da qui è possibile costruire delle curve che consentono di gestire meglio determinate caratteristiche relative ai vari elementi già definiti.
- **Time series (serie temporali):** consentono di inserire i dati di precipitazione.

### 3.3 Opzioni di simulazione

Una volta definita la rete, è possibile impostare i termini della simulazione andando a settare determinati parametri che SWMM utilizzerà nell'elaborazione della risposta del sistema agli eventi meteorici assegnati. Il tutto è attuabile dalla sezione "Options", di cui si riporta l'interfaccia grafica in figura 3.6.

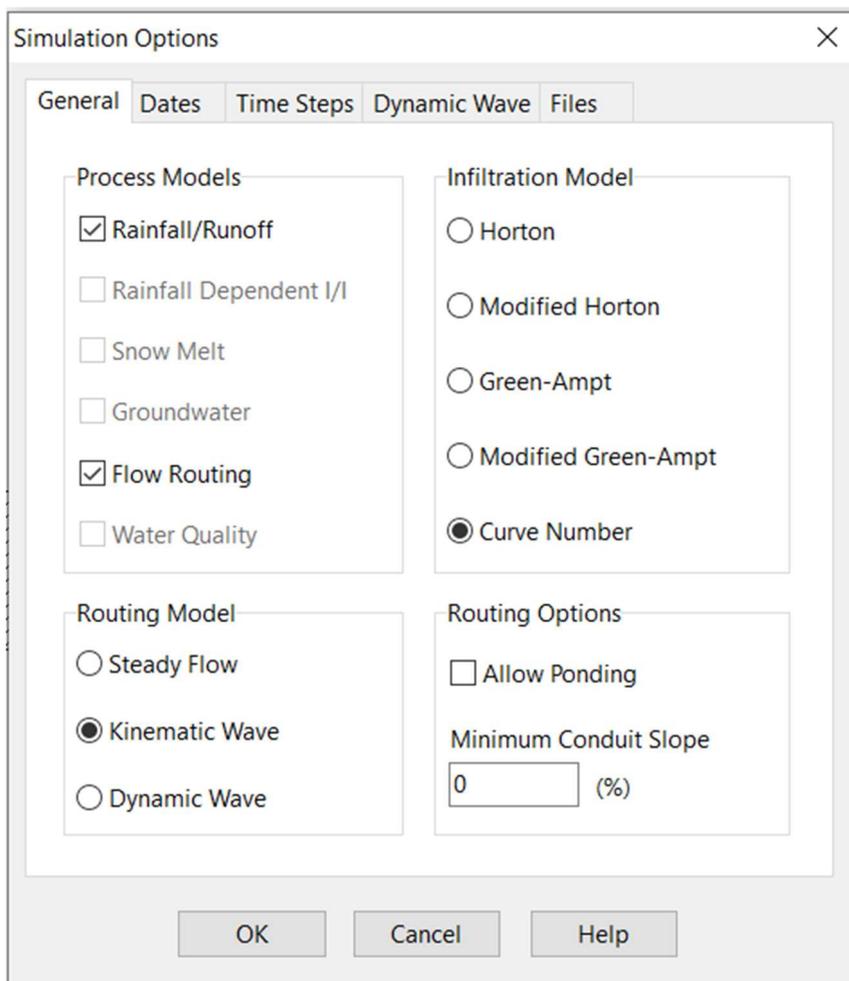


Figura 3.6- Interfaccia grafica della finestra di SWMM "Simulation Options" (produzione autonoma)

Tra le varie opzioni di simulazione settabili dal menù a tendina, troviamo varie sezioni:

- **General:** da qui si impostano i vari processi di cui si vuole tener conto scegliendo tra deflusso, scioglimento neve, qualità acqua, interazione con falda, e impostando i modelli di infiltrazione e propagazione che il software dovrà utilizzare nella fase computazionale;
- **Dates:** si impostano date e orari di inizio e fine della simulazione e dei report dei risultati;

- **Time Steps:** si sceglie l'intervallo di tempo di calcolo imposto al software per la simulazione;
- **Dynamic Wave:** sezione contenente parametri e opzioni da impostare nel caso in cui si scelga come modello di routing il "Dynamic wave".
- **Files:** qui è possibile specificare i file da utilizzare o da salvare durante una simulazione.

SWMM è un modello di simulazione a tempo discreto su base fisica, che utilizza i principi di conservazione della massa, dell'energia e, ove necessario, della quantità di moto. In tale paragrafo si punta a fornire una descrizione dei metodi che SWMM utilizza nella valutazione quantitativa e qualitativa dei flussi idrici attraverso i seguenti processi:

- **Deflusso superficiale;**
- **Infiltrazione (metodo del Curve Number);**
- **Onda cinematica.**

### 3.3.1 Deflusso superficiale

In SWMM, ogni sottobacino è visto come una superficie rettangolare avente pendenza costante e larghezza **W**, il cui flusso viene convogliato in

un canale e mandato verso un unico outlet (figura 3.7) ed è trattato come un serbatoio non lineare.

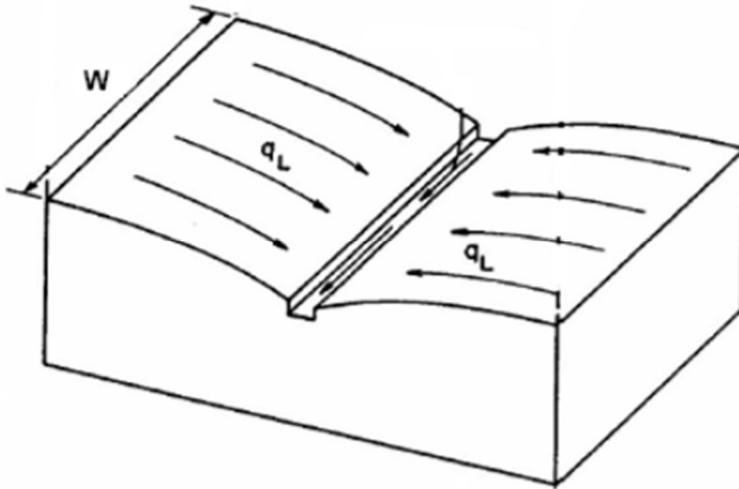


Figura 3.7- Schema utilizzato da SWMM nella valutazione del deflusso superficiale (SWMM Vol. I, 2016)

In particolare, il deflusso superficiale di un sottobacino viene inteso come il flusso generato da precipitazioni piovose, dallo scioglimento della neve o dal runoff di designati bacini a monte, al netto dei fenomeni di accumulo, evaporazione e infiltrazione (figura 3.8).

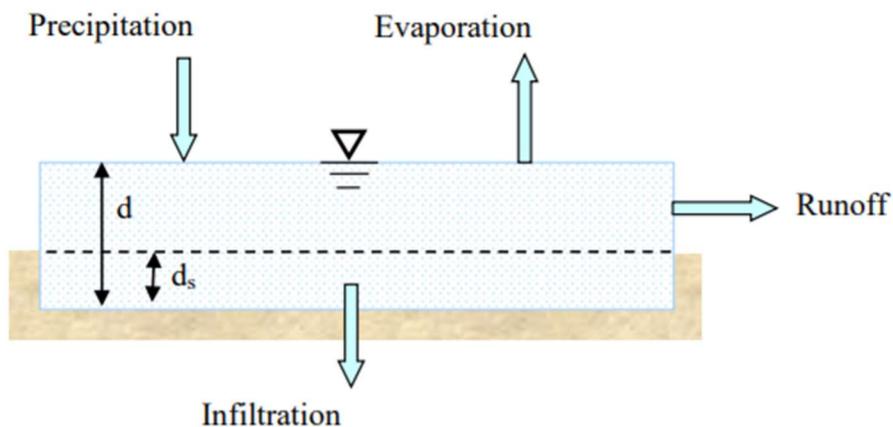


Figura 3.8- Modello di serbatoio non lineare usato da SWMM per trattare i sottobacini (SWMM Vol. I, 2016)

La profondità dell'acqua (indicata con  $d$  in figura 3.8) è calcolata numericamente dal software, che risolve un'equazione di conservazione della massa (equazione [5]), secondo cui la differenza di profondità all'interno del sottobacino per unità di tempo è data dalla quantità di acqua entrata meno quella uscita:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q_L \quad [5]$$

in cui  $i$  è la quantità d'acqua in ingresso [ft/s],  $e$  è il tasso di evaporazione [ft/s],  $f$  è il tasso di infiltrazione [ft/s] e  $q_L$  il deflusso superficiale [ft/s].

L'acqua che assume altezza  $d$  maggiore della profondità di stoccaggio  $d_s$ , genera deflusso superficiale, che SWMM calcola basandosi sull'equazione di Manning [6]:

$$Q = \frac{1.49}{n} W (d - d_s)^{5/3} S^{1/2} \quad [6]$$

In cui  $Q$  è la portata del flusso in termini di volume/secondo,  $n$  è il coefficiente di Manning,  $W$  è la larghezza del flusso all'interno del sottobacino,  $(d - d_s)$  è l'altezza dell'acqua defluita,  $S$  è la pendenza del bacino (che SWMM assume costante).

Per ottenere la portata per unità di superficie è sufficiente dividere l'equazione [6] per l'area del sottobacino  $A$ :

$$q_L = \frac{1.49 W}{n A} (d - d_s)^{5/3} S^{1/2} \quad [7]$$

Sostituendo l'equazione [7] nell'equazione [5], si ottiene la seguente espressione:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha(d - d_s)^{5/3} \quad [8]$$

in cui

$$\alpha = \frac{1.49 W}{n A} S^{1/2} \quad [9]$$

La relazione [8] rappresenta un'equazione differenziale, che noti i valori  $i, f, e, \alpha$  e  $d_s$ , viene risolta numericamente e viene ricavato il valore di  $d$  a ogni step temporale di calcolo imposto. Noto  $d$ , risulta semplice sostituirlo nell'equazione [7] e ricavare il valore di deflusso a ogni istante di calcolo. Agli istanti temporali in cui risulta  $d_s > d$ , la relazione [8] può essere epurata del termine contenente il deflusso superficiale  $q_L$  (che sarà pari a zero), e semplificata come segue:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f \quad [10]$$

### 3.3.2 Metodo di infiltrazione del Curve Number (CN)

Il software SWMM permette la valutazione dell'infiltrazione (ove permessa) seguendo i modelli visibili in figura 3.6. Tale paragrafo punta a descrivere in

modo più dettagliato il metodo del Curve Number utilizzato nello specifico caso di questo documento. Tale metodo, implementato e proposto dal Soil Conservation Service (SCS), è stato introdotto da SWMM per la semplicità concettuale dello stesso nella determinazione della quantità di acqua infiltrata in un terreno, disponendo della completa conoscenza dei fenomeni di precipitazione. La sua formulazione è figlia dell'equazione di bilancio riguardante i termini legati all'afflusso e quelli propri del deflusso. Tale modello ha senso solo sotto l'ipotesi di validità della relazione di proporzionalità sussistente tra le perdite dovute all'infiltrazione e lo scorrimento in superficie, secondo la seguente relazione:

$$\frac{F}{S_{max}} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad [11]$$

In cui:

- $F$  rappresenta il volume specifico infiltrato;
- $S_{max}$  è la massima capacità di ritenzione idrica del terreno (volume specifico di saturazione);
- $P_e$  è il deflusso superficiale;
- $P$  è la precipitazione cumulata lorda;
- $I_a$  rappresenta le perdite iniziali.
- $P_n = (P - I_a)$  è la pioggia netta cumulata.

Dall'equazione di continuità, poi, si giunge alla seguente relazione:

$$P_e = P - I_a - F \quad [12]$$

Sostituendo la [12] nella [11] si ottiene:

$$F = (P - I_a) - \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S_{max})} \quad [13]$$

SWMM utilizza i valori di  $F$  calcolati a ogni step temporale per valutare allo stesso istante un valore di tasso di infiltrazione  $f$ .

Per quanto riguarda  $P$ , è il valore di precipitazione fornito direttamente dal pluviometro.

$I_a$  riassume le perdite iniziali dovute all'intercettazione, all'infiltrazione e alla saturazione delle depressioni superficiali, ed essendo un termine di difficile valutazione, per semplicità, viene posto pari a:

$$I_a = 0.2 \cdot S_{max} \quad [14]$$

La formulazione di,  $S_{max}$ , infine, si presenta come di seguito:

$$S_{max} = S_0 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad [15]$$

Per quanto riguarda  $S_0$ , la prima delle due ultime variabili da determinare, esso è un fattore di scala il cui valore è funzione dell'unità di misura adottata. Per valori di  $S_{max}$ ,  $F$ , e  $P$  espressi in mm, il parametro  $S_0$  assume un valore pari a 254 mm, pari a 10 pollici in caso di adozione del sistema consuetudinario statunitense.

A proposito del  $CN$ , invece, è necessaria una parentesi più ampia. Esso è un parametro adimensionale che varia tra 0 e 100 in funzione del grado di permeabilità del terreno. In particolare, valori di  $CN$  vicini a 100 indicano terreni altamente impermeabili, che trasformano le precipitazioni quasi interamente in deflusso superficiale, mentre  $CN$  prossimi allo 0 descrivono

terreni ideali dal punto di vista dell'infiltrazione. La sua valutazione è legata essenzialmente a:

- Natura litologica del suolo;
- Tipo di copertura (uso del suolo);
- Condizioni di umidità del suolo antecedenti un evento meteorico;
- Periodo dell'anno (stagione di riposo o periodo di crescita).

Al fine di facilitare la determinazione di tale fondamentale parametro, nel 1972, il Soil Conservation Service (SCS) ha fornito delle tabelle molto pratiche da consultare secondo un certo ordine. Per prima cosa, si deve determinare la classe del suolo attraverso la tabella riportata nella seguente figura:

Tipo idrologico di suolo	Descrizione
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde, molto permeabili.
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloid, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.
D	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza delle superfici.

Figura 3.9- Tabella riassuntiva delle 4 classi del suolo proposte dall'SCS (Madera V., 2021-  
<https://www.studiomadera.it/es/108-cn-curve-number>)

Una volta individuata la tipologia idrologica di suolo, viene fornita una seconda tabella da cui estrapolare il valore del CN in funzione del tipo di copertura (uso del suolo):

Tipo di copertura (uso del suolo)	TIPO SUOLO			
	A	B	C	D
<b>TERRENO COLTIVATO</b>				
Senza trattamento di conservazione	72	81	88	91
Con interventi di conservazione	62	71	78	81
<b>TERRENO DA PASCOLO</b>				
Cattive condizioni	68	79	86	89
Buone condizioni	59	61	74	90
<b>PRATERIE</b>				
Buone condizioni	30	58	71	78
<b>TERRENI BOSCOSSI O FORESTATI</b>				
Terrano sottile, sottobosco povero, senza foglie	45	66	77	83
Sottobosco e copertura buoni	25	55	70	77
<b>SPAZI APERTI, FRATIRASATI, PARCHI</b>				
Buone condizioni con almeno il 75% dell'area con copertura erbosa	39	61	74	80
Condizioni normali, con copertura erbosa intorno al 50%	49	69	79	84
<b>AREE COMMERCIALI (impermeabilità 85%)</b>	89	92	94	95
<b>DISTRETTI INDUSTRIALI (imper. 72%)</b>	81	88	91	93
<b>AREE RESIDENZIALI</b>				
Impermeabilità media %				
65	77	85	90	92
58	61	75	83	87
50	57	72	81	86
30	54	70	80	85
25	51	68	79	84
<b>PARCHEGGI IMPERMEABILIZZATI</b>	98	98	98	98
<b>STRADE</b>				
Pavimentate con cordoli e fognature	98	98	98	
Inghiaiate o selciate con buche	76	85	89	91
In terra battuta (non asfaltate)	72	82	87	89

Figura 3.9- Tabella relativa alle tipologie di uso del suolo proposte dall' SCS (Madera V., 2021-<https://www.studiomadera.it/es/108-cn-curve-number>)

Una volta suddiviso il bacino in funzione delle caratteristiche descritte, e assegnato un certo CN a ciascuna di queste aree, sarà possibile appellarsi alla seguente formulazione, proposta Mancini e Rosso (1989), per la valutazione del CN dell'intero bacino come media ponderata dei singoli valori ottenuti per ciascuna sottoarea:

$$CN_{tot} = \frac{\sum CN_i A_i}{A_{tot}} \quad [16]$$

Con:

- $CN_{tot}$  e  $A_{tot}$  che sono, rispettivamente, il CN e l'area dell'intero bacino;
- $CN_i$  e  $A_i$  che rappresentano i CN e le aree dei vari sottobacini;

In ultima istanza, è necessario avere chiare le condizioni di saturazione del terreno al fine di una corretta previsione del comportamento idrologico di un bacino. In tale ambito, si tiene conto dello stato di saturazione del terreno valutando le condizioni di umidità del terreno sulla base dei 5 giorni antecedenti l'evento (AMC, Antecedent Moisture Condition). L'AMC è deducibile dalla seguente tabella:

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

Figura 3.10- Tabella per valutazione AMC fornita dall'SCS (Madera V., 2021- <https://www.studiomadera.it/es/108-cn-curve-number>)

Le tabelle precedenti (figura 3.8 e 3.9), sono valide per condizioni medie di umidità del suolo prima dell'evento (classe II). Per la valutazione dei CN di terreni le cui condizioni prima dell'evento risultino molto umide o molto asciutte (Classi III e I rispettivamente), si ricorre alle seguenti espressioni:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad [17]$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad [18]$$

### 3.3.3 Modello dell'onda cinematica (Kynematic Wave)

Tra i modelli già elencati che SWMM propone per la modellazione del flusso all'interno dei collettori, all'interno del presente studio si è evitato di scegliere quello dell'onda dinamica, seppur risulti essere il migliore a livello di completezza e potenzialità. Infatti, la semplicità idraulica del sistema da modellare, si è preferito di optare per il modello dell'onda cinematica, abbastanza attendibile e sicuramente meno oneroso computazionalmente rispetto al citato Dynamic Wave.

Le equazioni su cui si erge il modello in questione, sono quelle di De Saint-Venant per la conservazione della massa e della quantità di moto, di seguito riportate:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{Equazione di continuità}) \quad [19]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (\text{Quantità di moto}) \quad [20]$$

In cui,  $Q$  risulta essere la portata defluita attraverso la sezione avente sezione idrica  $A$  e ascissa curvilinea  $x$ , all'istante temporale  $t$ ,  $H$  è il carico piezometrico valutato rispetto a un prefissato riferimento,  $g$  è la costante gravitazionale, pari a  $9,81 \text{ m/s}^2$ , ed  $S_f$  rappresenta la cadente piezometrica. Esprimendo  $H$  come  $Z + Y$  (ossia quota del fondo del canale o del condotto e tirante idrico), e sapendo che  $\frac{\partial Z}{\partial x} = S_0$  (con  $S_0$  pendenza del fondo) si può esprimere la relazione [20] come segue:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial Y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad [21]$$

Esplicare la cadente piezometrica servendosi dell'equazione di Manning (equazione [22]) consente di giungere a una relazione diretta tra la portata  $Q$  e la sezione idrica  $A$  tramite l'equazione di Manning per il flusso uniforme ([23]):

$$S_f = \left( \frac{n}{1.486} \right)^2 \frac{Q|U|}{AR^{4/3}} \quad [22]$$

In cui  $n$  è nuovamente il coefficiente di Manning,  $R$  rappresenta il raggio idraulico della sezione e  $U$  è la velocità media del flusso idrico.  $U$  è preso in valore assoluto in modo da rendere  $S_f$  una quantità direzionale (dal momento che  $Q$  può assumere valori positivi o negativi), garantendo che la forza di attrito abbia sempre verso opposto rispetto al flusso.

$$Q = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \sqrt{S_0} \quad [23]$$

Imponendo  $\beta = 1.486\sqrt{S_0}/n$  e  $\Psi = AR^{2/3}$ , la relazione [23] si può esprimere come:

$$Q = \beta\Psi(A)$$

[24]

$\Psi$  è detto fattore di sezione (Chow, 1959) ed è funzione della sezione idrica all'interno del condotto. In figura 3.11, si mostra come per una condotta chiusa avente sezione circolare, raggiunge il massimo per sezioni idriche minori della sezione totale disponibile (si ha il massimo della portata per una sezione idrica pari al 93% di quella disponibile):

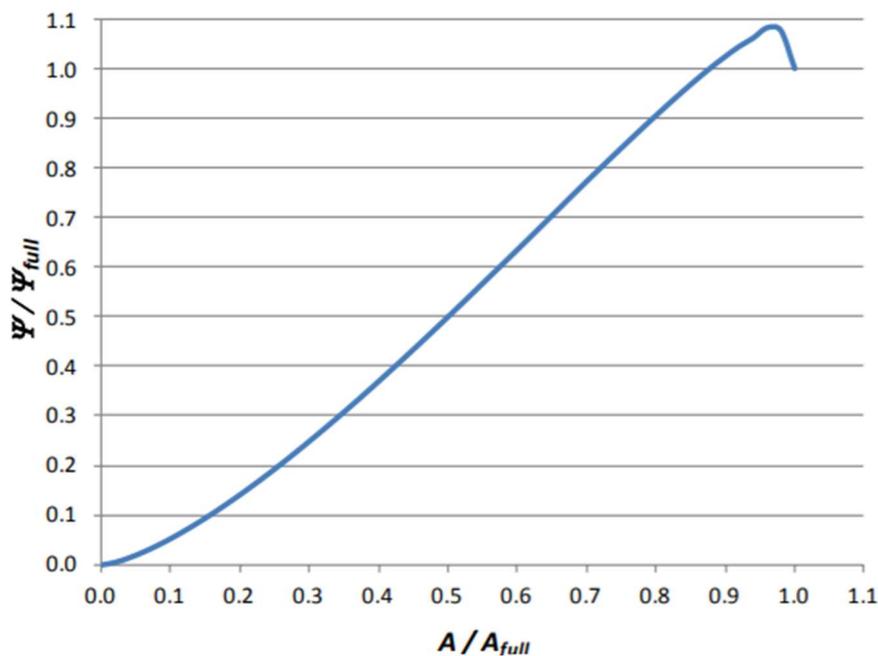


Figura 3.11- Andamento del fattore di sezione in funzione della sezione idrica (SWMM Vol. II, 2016)

Concludendo tale sezione, le equazioni governanti il modello dell'onda cinematica lungo un singolo condotto sono l'equazione di continuità [19] insieme all'equazione [24], che mette in relazione la portata con la sezione idrica.

Le variabili dipendenti in queste equazioni sono la portata  $Q$  e l'area di flusso  $A$ , che sono funzioni della distanza  $x$  e del tempo  $t$ . Per risolvere

queste equazioni su un singolo condotto di lunghezza  $L$ , è necessario un insieme di condizioni iniziali per  $Q$  o  $A$  al tempo 0 e una condizione al contorno per entrambe le variabili in  $x = 0$  per tutti gli step temporali  $t$ .

### 3.4 Inserimento unità LID e funzionamento in SWMM

Quest'ultima sezione sarà incentrata sulla possibilità offerta da SWMM di inserire, in fase di progettazione di un modello, delle unità LID, al fine di valutarne le prestazioni. In particolare, il software in questione consente la modellazione di celle di bioritenzione, tetti verdi, giardini della pioggia, pavimentazioni permeabili, trincee drenanti, serbatoi e disconnessioni dei tetti. Tali unità sono definite come sovrapposizione di layers verticali, che permettono infiltrazione, percolazione e stoccaggio delle acque meteoriche (figura 3.12) secondo parametri impostati dall'utente.

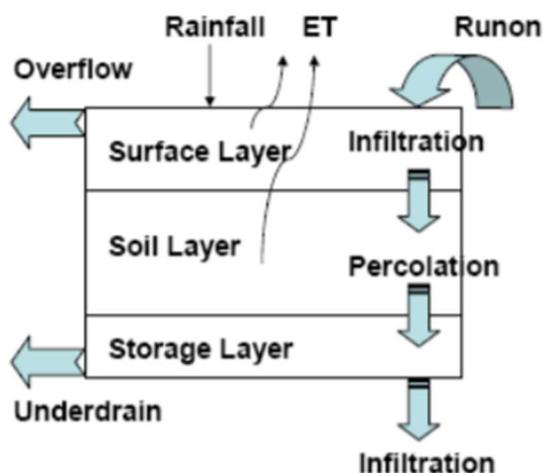


Figura 3.12- Concettualizzazione di una cella di bioritenzione in SWMM (SWMM Vol. III, 2016)

SWMM chiederà la definizione solo di alcuni layers, in funzione della tipologia di LID che si vuole modellare. Per completezza, si riporta di seguito una lista e una breve descrizione di tutti gli strati che SWMM propone. In figura 3.13, invece, è riportata una tabella riassuntiva di tutti i layers che SWMM utilizza in funzione dell'unità LID scelta.

- **Surface (superficie):** è lo strato superficiale (terreno), su cui ricade direttamente il flusso idrico. Per tale layer, è necessario inserire un valore di "Berm" che rappresenta l'altezza di stoccaggio disponibile prima che sia generato deflusso superficiale. Vi sono, poi, da settare dei parametri di infiltrazione che regolano, appunto, l'infiltrazione verso gli strati sottostanti.
- **Pavement (pavimentazione):** tale layer è da definire solo nel caso di modellazione di pavimentazioni permeabili e permette il settaggio dei parametri relativi agli strati permeabili delle stesse.
- **Soil (suolo):** è la miscela di suolo che fornisce sostentamento alla vegetazione prevista all'interno delle varie unità. Anche talo strato filtra l'acqua.
- **Storage (stoccaggio):** rappresenta lo strato costituito da materiale grossolano e che garantisce un certo volume di accumulo alle LID per cui è previsto. Il volume idrico stoccato al suo interno può essere

infiltrato verso il sottostante (impostando un valore di “seepage rate” maggiore di 0) o drenato verso l’uscita.

- **Drain system (sistema di drenaggio):** ha il compito di drenare l’acqua dello “storage” tramite camere o condotte.
- **Drainage Mat (tappeto drenante):** è un tappetino posizionato al di sotto del terreno nei tetti verdi, al fine di convogliare e allontanare la percolazione proveniente dagli strati sovrastanti.

LID Type	Surface	Pavement	Soil	Storage	Drain	Drainage Mat
Bio-Retention Cell	x		x	o	o	
Rain Garden	x		x			
Green Roof	x		x			x
Permeable Pavement	x	x	o	x	o	
Infiltration Trench	x			x	o	
Rain Barrel				x	x	
Roof Disconnection	x				x	
Vegetative Swale	x					

Figura 3.13- Layers proposti da SWMM in funzione del tipo di LID (SWMM Vol. III, 2016)

Una volta definite le caratteristiche di ciascun layer proprio delle varie unità LID, è necessario collocarle all’interno di un certo “Subcatchment”. Per assegnare le caratteristiche di inserimento, bisogna riempire i campi proposti dalla sezione “LID editor” di SWMM. Una trattazione dettagliata di

tale sezione è rimandata al Capitolo 5, inerente alla calibrazione del modello in SWMM.

I modelli di calcolo utilizzati dal software per il trattamento delle unità LID proposte all'interno della modellazione effettuata nell'ambito di questo studio vengono esplicate nei seguenti paragrafi.

### 3.4.1 Equazioni per le Bio-Retention Cells

La modellazione idrologica di tali unità in SWMM è basata sulle seguenti assunzioni:

1. L'area della sezione trasversale dell'unità è costante per tutta la sua profondità;
2. L'acqua che fluisce all'interno dell'unità lo fa secondo un moto unidirezionale in direzione verticale.
3. L'afflusso entrante nell'unità si distribuisce uniformemente su tutto il layer superficiale;
4. Il contenuto di umidità è distribuito uniformemente all'interno di tutto lo strato di terreno.
5. Lo "storage layer" viene trattato come un semplice serbatoio che immagazzina e infiltra acqua.

Per ciascuno strato che caratterizza una cella di bio-ritenzione sono utilizzate delle opportune relazioni, di seguito elencate:

$$\phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i - q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad (\text{Surface layer}) \quad [25]$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad (\text{Soil layer}) \quad [26]$$

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad (\text{Storage Layer}) \quad [27]$$

In cui:

- $d_1$  = profondità d'acqua immagazzinata in superficie;
- $\theta_2$  = contenuto di umidità nel soil layer;
- $d_3$  = profondità d'acqua nello storage layer;
- $i$  = tasso di precipitazione che cade direttamente sulla superficie;
- $q_0$  = afflusso in superficie dovuto al deflusso delle altre zone;
- $q_1$  = portata per unità di superficie nello strato superficiale;
- $q_3$  = portata per unità di superficie che viene scaricata dallo strato di stoccaggio;
- $e_1$  = evapotraspirazione superficiale;
- $e_2$  = evapotraspirazione nel soil layer;
- $e_3$  = evapotraspirazione nello storage layer;
- $f_1$  = infiltrazione dalla superficie allo strato sottostante;
- $f_2$  = percolazione d'acqua attraverso il soil layer verso lo strato di stoccaggio;
- $f_3$  = esfiltrazione dallo strato di stoccaggio al terreno naturale;
- $\phi_1$  = frazione di vuoti in superficie;
- $\phi_2$  = porosità del soil layer;
- $\phi_3$  = frazione di vuoti nello storage layer;

- $D_1$  = altezza che delimita il ristagno superficiale;
- $D_2$  = spessore dello strato di terreno;
- $D_3$  = spessore dello storage layer.

Questa serie di equazioni accoppiate è risolta numericamente ad ogni step temporale impostato per il deflusso, per determinare come un idrogramma di afflusso all'unità LID ( $i + q_0$ ) viene convertito in idrogrammi per il deflusso superficiale ( $q_1$ ), il deflusso del sottosuolo ( $q_3$ ) e l'esfiltrazione nel terreno nativo circostante ( $f_3$ ).

### 3.4.2 Equazioni per i Green Roofs

La stratigrafia propria dei “green roofs” proposta da SWMM risulta molto simile a quella già vista per le “bio-retention cells”, eccezion fatta per lo strato di stoccaggio che, adesso, è rimpiazzato da un tappetino drenante. Quest’ultimo elemento presenta scarse potenzialità di stoccaggio e drenaggio dell’acqua proveniente dai layers superiori, per cui ne è particolarmente consigliato l’utilizzo solo nel caso di coperture inclinate. In caso di tetti piani, i tappetini sono sostituiti da tubi fessurati inseriti sul fondo di uno strato di ghiaia del tutto simile a quello presente nelle aree di bio-ritenzione, con la differenza che in tal caso non è consentita l’infiltrazione dell’acqua nel terreno naturale. Le equazioni governanti il

comportamento dei tetti verdi che presentano tappetini drenanti, sono le seguenti:

$$\phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i - e_1 - f_1 - q_1 \quad (\text{Surface layer}) \quad [28]$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad (\text{Soil layer}) \quad [26]$$

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - q_3 \quad (\text{Drainage Mat}) \quad [29]$$

Si nota la somiglianza tra questo tris di equazioni e quello visto nel paragrafo immediatamente precedente. Le uniche differenze sono date dall'assenza, in questo caso, dei termini  $q_0$ , in quanto i tetti verdi non trattano il deflusso proveniente da altre aree, ma solo la precipitazione ricadente sulla porzione da esso occupata, ed  $f_3$ , poiché, essendo la superficie sottostante il tappetino composta da una guaina impermeabilizzante, non è permessa esfiltrazione.

Si riporta, in figura 3.14, una rappresentazione di come il flusso idrico sulla superficie di un "green roof" è schematizzato da SWMM.

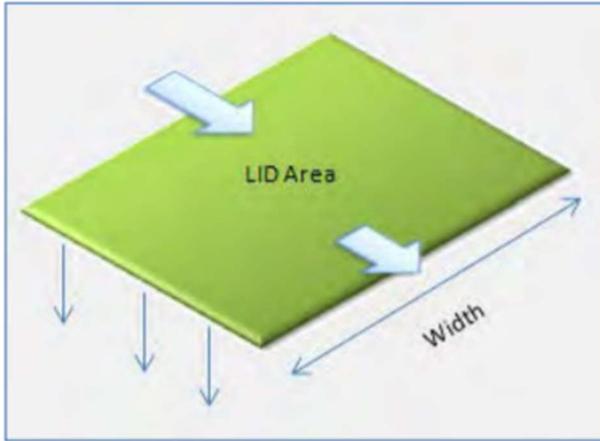


Figura 3.14- Percorso del flusso sulla superficie di un green roof (SWMM Vol. III, 2016)

# Capitolo 4

## Progetto pilota

Tale sezione mira a una più dettagliata descrizione dell'intervento pilota realizzato presso l'ostello Open 011 (Torino). Le informazioni riportate di seguito sono estrapolate da varie fonti: documenti relativi all'intervento pilota quali *“Relazione di autovalutazione intermedia”*, *“Capitolato”* e *“planimetrie di progetto”*, colloqui avuti con addetti ai lavori e sopralluoghi in situ.

### 4.1 Contesto e obiettivi

Sulla base delle considerazioni fatte finora, risulta più semplice intuire la necessità di porre solide fondamenta alla base della tecnologia SuDS, nonché della sua sperata diffusione. Risulta, infatti, di primaria importanza effettuare una campagna di informazione e sensibilizzazione mirata a far conoscere alla popolazione le varie problematiche connesse alle attuali tecniche di drenaggio urbano, facendo cogliere a tutti il perché della necessità di un'integrazione che le tecniche di drenaggio urbano sostenibile potrebbero consentire.

Il progetto pilota in questione si inserisce all'interno della ben più ampia iniziativa CWC (Circle Water City), il cui intento è quello di attuare un rinnovamento dei sistemi di drenaggio urbano, prediligendo schemi più sostenibili , cercando di combinare varie caratteristiche che vadano a

ridurre gli sprechi e a incentivare il riutilizzo dei beni attraverso un approccio di economia circolare, capace di apportare significativi vantaggi in termini ambientali ed economici.

Si proverà a raggiungere tale obiettivo con la diffusione di una cultura del risparmio idrico e promuovendo una migliore governance nell'ambito della raccolta e della gestione dell'acqua piovana ricadente sul tessuto urbano. I partner del progetto CWC (in tutto 12 città del Centro Europa, tra cui Torino) puntano, tramite l'attuazione di interventi pilota, a creare una base comune di conoscenza per la gestione di tali acque.

L'intervento pilota presentato dalla Città di Torino è finanziato con fondi europei nell'ambito del progetto CWC è definito "Tetto verde dell'Open 011".

Per l'Open 011-Casa della mobilità giovanile e dell'intercultura, ostello situato a pochi chilometri dal centro di Torino, il Servizio Urbanizzazioni ha progettato un giardino pensile e una serra aeroponica, irrigate da un sistema alimentato con acqua piovana. Ciò costituisce un vantaggioso sistema circolare: infatti, oltre al consumo nullo di acqua proveniente dall'acquedotto per l'irrigazione delle piante, nella serra potrà essere coltivato cibo immediatamente disponibile per la struttura di accoglienza, mentre il tetto verde potrà divenire un punto di aggregazione per gli ospiti dell'ostello, nonché rappresentare un'"isola di freschezza" i cui effetti benefici si ripercuoteranno sull'intero isolato. Il piano offre molti vantaggi economici ed ambientali (risparmi significativi di acqua ed energia).

In definitiva l'attuazione del pilota rappresenta un'opportunità per testare alcune pratiche innovative circa il ciclo dell'acqua, permettendo sia di

costruire conoscenza all'interno degli uffici della pubblica amministrazione, sia di sensibilizzare la comunità nei confronti della conservazione di una risorsa fondamentale come l'acqua.

## 4.2 Sito e motivazioni

Il fabbricato scelto per la realizzazione di tale progetto, costruito nel corso degli anni '40 e situato nella zona Nord della città di Torino, in Corso Venezia 11 (di seguito, al fine di un miglior inquadramento geografico, in figura 4.1, si fornisce una presa dall'alto del sito di interesse, ricavata da Google Maps)., ha ospitato la fabbrica di utensili "Elli & Zerboni" fino agli anni '80. In seguito, in occasione dei Giochi Olimpici Invernali tenutisi a Torino nel 2006, lo stesso è stato convertito nell'attuale ostello Open 011.

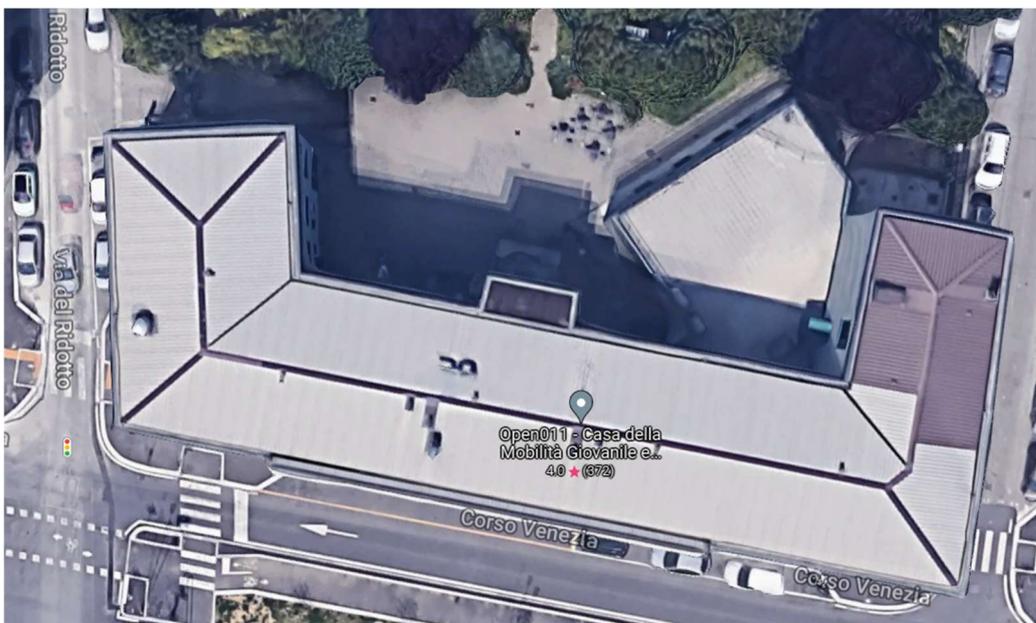
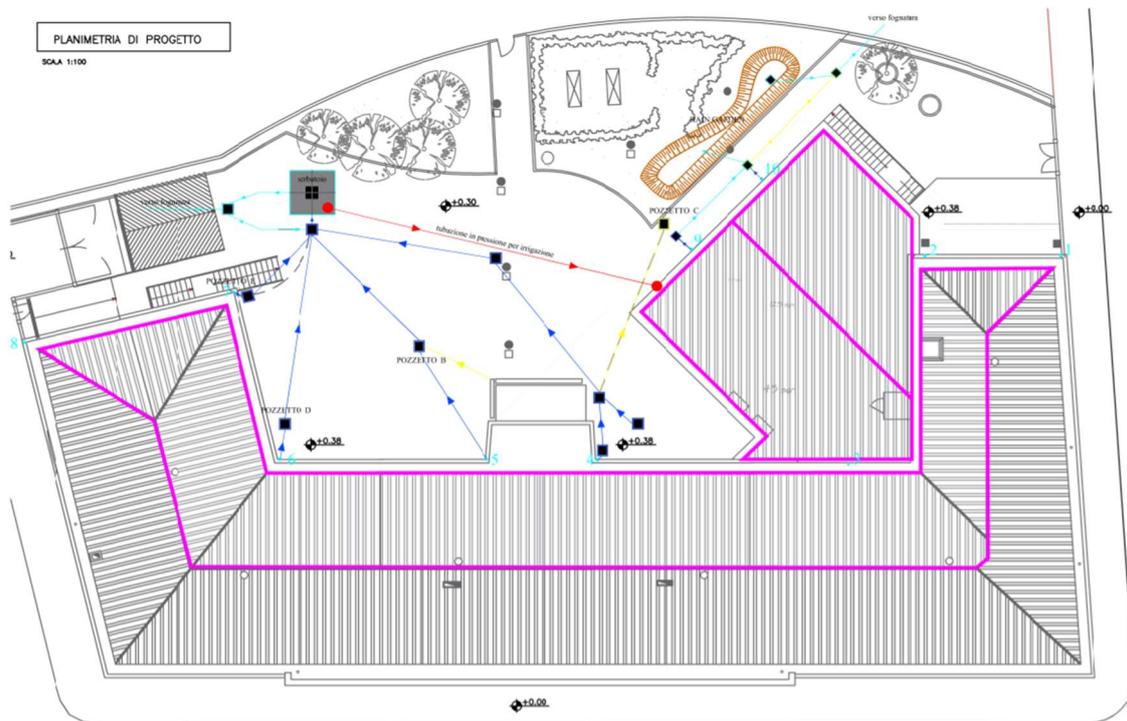


Figura 4.1- Vista aerea dell'Open 011- Fonte: Google Maps

La scelta di tale luogo per l'implementazione del progetto pilota CWC non è affatto casuale, infatti, l'edificio in questione è certificato ECOLABEL UE e ospita già dei dispositivi ICT (come un sistema di monitoraggio della temperatura e una stazione meteorologica) per il controllo delle prestazioni ambientali dell'edificio. Inoltre, l'edificio ospita una terrazza molto ampia, realizzata in vista della sua conversione a ostello, che funge da copertura di una sala polifunzionale e che risulta perfetta per ospitare il tetto verde in questione. In ultima istanza, essendo l'obiettivo principale di tale intervento quello di creare un esempio applicativo circa i SuDS e di diffondere una nuova concezione dell'utilizzo dell'acqua, risulta immediatamente chiaro come la corte di un ostello rappresenti il sito ideale in cui realizzare i principi che il progetto si pone di raggiungere, costituendo un punto di massima diffusione delle idee in gioco.

## 4.3 Progetto

Il vantaggio principale di tale sito è dato dal fatto che l'edificio in questione dispone di un ampio terrazzo e di una tettoia metallica facilmente convertibili in un sistema di raccolta e riutilizzo dell'acqua piovana. L'unico problema è legato all'impossibilità di sfruttare l'intera superficie del tetto per la raccolta dell'acqua, in quanto, una parte di esso drena l'acqua in modo da convogliarla sul lato opposto rispetto a quello di interesse, cioè nella strada principale anziché nella corte interna. Al fine di rendere più intuitivo lo schema attuato e di riuscire a cogliere con maggiore facilità gli aspetti più interessanti del progetto, si riporta di seguito la planimetria di progetto dell'intervento e la relativa legenda (figura 4.2):



LEGENDA	
ELEMENTI FUNZIONALI	
	Falde del tetto da cui si recuperano le acque
	Pluviali esistenti deviati
	Rain Garden di progetto
	Serbatoio di progetto
POZZETTI	
	Pozzetti esistenti
	Pozzetti di progetto
	Pozzetti da modificare
	Pozzetti dismessi

LEGENDA	
TUBAZIONI	
	Tubazioni a gravità esistenti
	Tubazioni a gravità di progetto
	Tubazioni a gravità dismesse
	Tubazioni a pressione per irrigazione

Figura 4.2- Planimetria di progetto intervento pilota CWC con annessa legenda (Capitolato di progetto)

L'intervento include i seguenti elementi:

- Un nuovo *tetto verde intensivo* (chiamato anche *giardino pensile*) di circa 179 m<sup>2</sup>;

- Un serbatoio interrato con capacità di circa 9 m<sup>3</sup> per alimentare l'irrigazione del giardino pensile senza attingere dall'acquedotto;
- Una *serra aeroponica* atta alla coltivazione di cibo, posizionata, insieme a una cisterna di circa 0,35 m<sup>3</sup>, in una piccola area della terrazza ospitante il tetto verde;
- Un *rain garden* con una superficie di circa 6 m<sup>2</sup> e un volume di stoccaggio di 12 m<sup>3</sup> per accumulare e infiltrare lentamente parte dell'acqua piovana raccolta.

Lo schema di raccolta e riutilizzo dell'acqua piovana è così articolato:

- L'acqua defluita su una porzione rivolta verso la corte interna dell'edificio della parte più alta della copertura (circa 230 m<sup>2</sup>) viene incanalata verso un serbatoio di accumulo di circa 9 m<sup>3</sup>, per essere riutilizzata per l'irrigazione del *tetto verde*. Il troppo pieno di tale serbatoio viene scaricato direttamente nell'esistente fognatura;
- L'acqua piovana raccolta dalla porzione restante della copertura più alta (di circa 109 m<sup>2</sup>) viene indirizzata verso una cisterna di circa 350 litri e riutilizzata per l'irrigazione dell'aeroponica;
- Infine, un dreno che convoglia la percolazione del giardino pensile e il troppo pieno della cisterna più piccola vengono indirizzati verso un *rain garden* che accumula e filtra acqua, avente una superficie di circa 6 m<sup>2</sup> e volume pari a circa 12 m<sup>3</sup> (corrispondente a un evento piovoso di circa 20 mm, equivalente a un evento con TR di 5-10 anni). Il troppo pieno del *rain garden* è regolato da un pozzetto, la cui bocca

emerge di 10 cm rispetto al piano del giardino, collegato direttamente alla rete fognaria esistente.

Di seguito, le unità appena introdotte verranno trattate più dettagliatamente.

### 4.3.1 Tetto verde

Il tetto verde di tipo intensivo, progettato nel rispetto dei requisiti della **Norma UNI 11235**, sorgerà su una terrazza esistente con superficie di 179 m<sup>2</sup> e pendenza che determina la direzione del flusso idrico superiore all'1%, previa rimozione di uno strato di pavimentazione galleggiante (le figure 4.3 e 4.4 mostrano una ripresa fotografica della terrazza esistente e l'immagine di un plastico del futuro giardino pensile, non ancora ultimato in fase di stesura del presente documento).



Figura 4.3- Foto dall'alto della terrazza ospitante il tetto verde- (Google Maps)

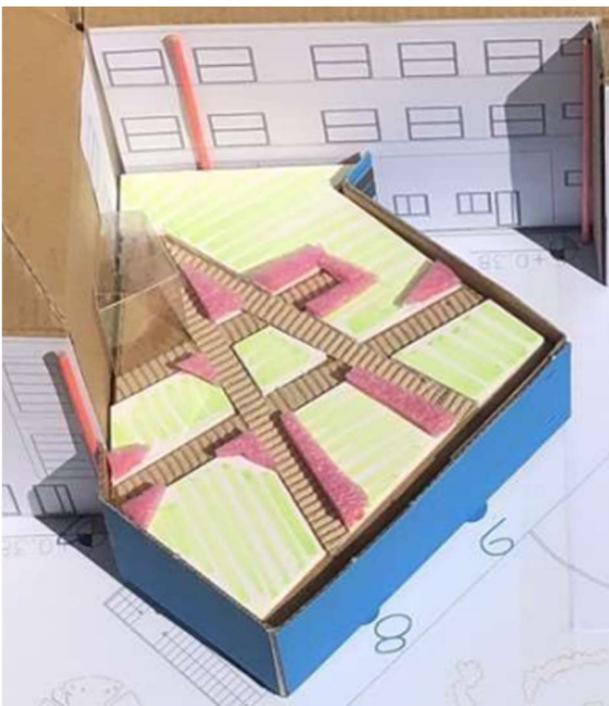


Figura 4.4- Plastico tetto verde

Esso è pensato per adempiere a quattro obiettivi principali:

- Laminare la portata massima entrante nei collettori fognari;
- Utilizzare parte dell'acqua meteorica per scopi nuovi, come l'irrigazione delle specie vegetative che qui trovano dimora;
- Mitigare gli effetti di urbanizzazione e cambiamento climatico, attraverso la presenza di uno strato floristico pensato in modo da riuscire a trattenere una certa percentuale degli inquinanti presenti in grande quantità nell'atmosfera delle aree urbane. La vegetazione, inoltre, grazie ai processi di evapotraspirazione che la interessano, risulterà una valida "nemica" delle isole di calore causate dalla presenza di numerose superfici asfaltate e di edifici alti che vanno a ridurre il circolo dell'aria.
- Rappresentare una valida area di svago e relax per gli ospiti della struttura, dotata di un ambiente molto gradevole dal punto di vista estetico e microclimatico.

Per quanto riguarda l'aspetto agronomico del giardino pensile, le specie botaniche allocate in tale spazio sono state selezionate e posizionate (geograficamente parlando) sul tetto secondo diversi criteri. Per quanto concerne la selezione, la scelta è dipesa da fattori quali:

- ciclo biologico, fondamentale per avere uno spazio sempre popolato da piante vive, in grado anche di richiamare specie faunistiche che vadano ad arricchire la biodiversità dell'ambiente;
- clima e illuminazione a disposizione delle stesse;
- limitazioni imposte dalla geometria dell'apparato radicale e del substrato.

Le varie specie sono state posizionate all'interno del giardino in modo oculato, al fine di raggiungere certi standard estetici dell'insieme, ma anche tenendo conto delle umidità potenziali delle varie zone del tetto, più o meno adatte per ospitare le diverse unità vegetative. La figura 4.5 mostra un'illustrazione preliminare delle specie scelte e del loro posizionamento all'interno dello spazio preposto ad ospitarle:



Figura 4.5- Specie floreali selezionate e relativo posizionamento all'interno del giardino pensile (Capitolato di progetto)

Per quanto riguarda la composizione del substrato, in larga percentuale costituita da pomice e lapillo (materiali altamente porosi e leggeri, in modo da non appesantire eccessivamente la copertura portante), i materiali sono stati scelti in funzione delle esigenze delle piante, in termini di pH, tessitura, granulometria, capacità di ritenzione idrica e di scambio cationico. Le principali caratteristiche di tale porzione risultano essere le seguenti: massa di particelle con granulometria < 0,05 mm inferiore al 3%, sostanza organica

minore del 5% in massa, porosità compresa tra il 60 e il 70%, velocità di infiltrazione tra 15 e 60 mm/min, contenuto d'acqua al punto di appassimento pari a circa l'8% in volume.

Il substrato, come si evince chiaramente dalla figura 4.6, poggia su un telo filtrante in geotessile non tessuto, la cui funzione principale è quella di far sì che l'apparato radicale della flora non invada gli strati sottostanti. Al di sotto di tale telo, viene posizionato un elemento di drenaggio e areazione in materiale polimerico di 25 mm di spessore sagomato a vaschette, con aperture per l'aerazione e l'allontanamento dell'umidità e rete multi direzionale di canali per il drenaggio sulla faccia inferiore.

L'ultimo strato, atto alla protezione da urti dell'esistente guaina impermeabilizzante, è rappresentato da un feltro in geotessuto.

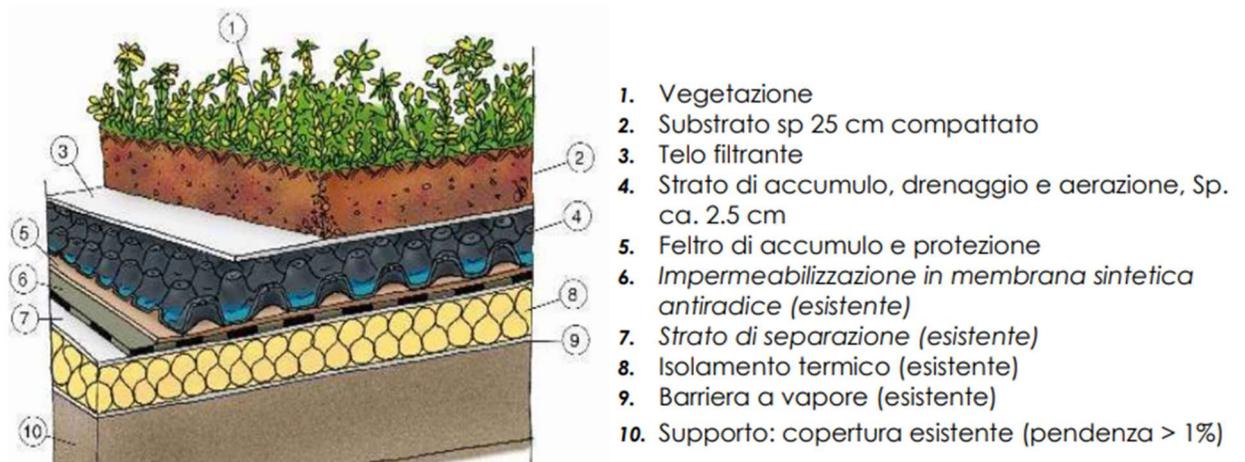


Figura 4.6- Stratificazione tetto verde (Capitolato di progetto)

Alla vegetazione, essendo il giardino pensile pensato per poter essere vissuto dagli ospiti dell'ostello, si alternano percorsi pedonali la cui pavimentazione in legno è interamente drenante che poggia su una stratigrafia del tutto simile a quella adottata nelle parti coltivate, e panchine anch'esse ricoperte di legno di castagno.

### 4.3.2 Rain garden

L'altra unità LID, che verrà installata all'interno di un'esistente aiuola verde, immediatamente ai piedi del giardino pensile, è un rain garden il cui fondo vasca presenta una superficie di circa  $6 \text{ m}^2$  e che presenta un volume di stoccaggio di circa  $12 \text{ m}^3$ . Nelle figure 4.7 e 4.8 che seguono si riportano pianta e sezioni del suddetto giardino della pioggia, realizzate tramite l'ausilio di AutoCAD dai realizzatori dell'intervento.

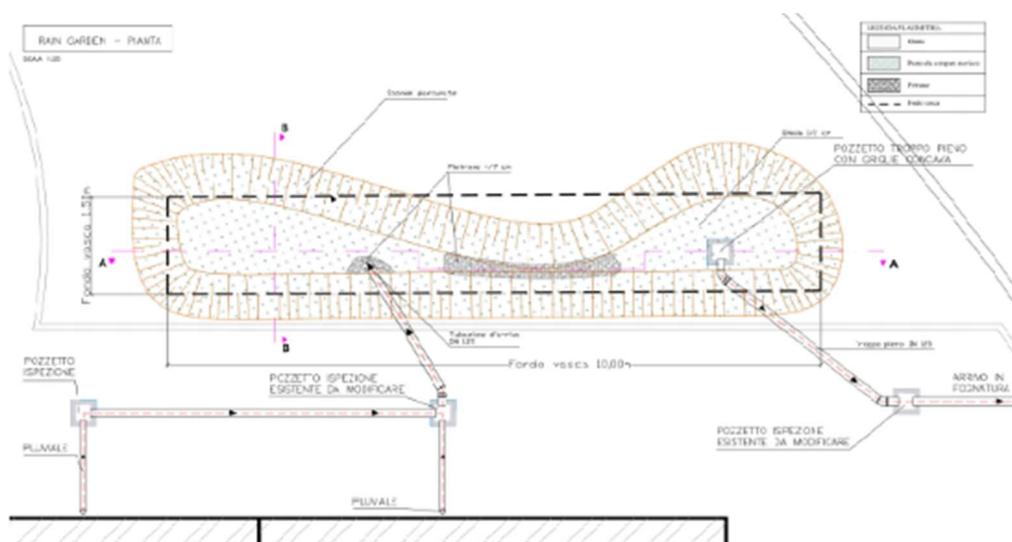


Figura 4.7- Pianta rain garden

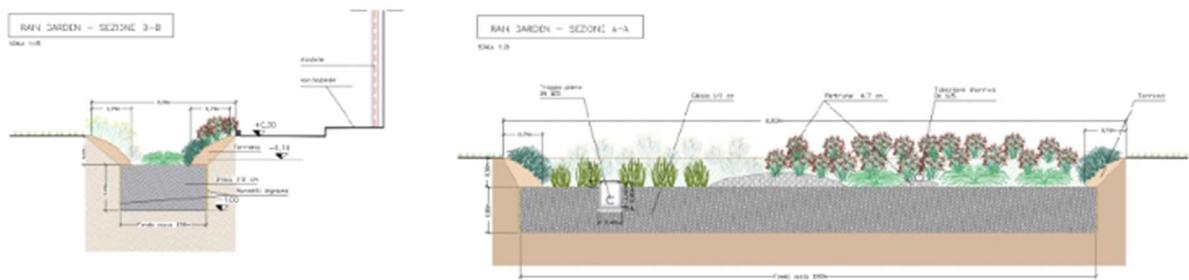


Figura 4.8- Sezioni rain garden

Il *rain garden* è stato pensato e progettato per accogliere l'acqua non trattenuta dal tetto verde, stoccandola al suo interno e cercando di infiltrarne il più possibile attraverso il sottosuolo. Come si evince dagli elaborati grafici, la sua realizzazione prevede uno scavo della superficie esistente, con un fondo scavo di 50 cm, da cui partono sponde inclinate la cui larghezza è pari a 70 cm. Sul fondo scavo sarà, poi, posizionato un pozzetto rialzato di 10 cm, il cui compito sarà quello di svolgere la funzione di troppo pieno del giardino una volta superato tale tirante, convogliando l'acqua in eccesso verso l'esistente allaccio fognario. Al di sotto del fondo scavo verrà adagiato uno strato di ghiaia di diametro  $\frac{1}{2}$  cm, di 80 cm di spessore per facilitare il deflusso naturale delle acque, con interposto uno strato di tessuto non tessuto. Al centro della depressione verrà invece utilizzato pietrame di diametro 4-7 cm. Sulle sponde e sul fondo verranno messe a dimora specie vegetali in base al loro adattamento ad ambienti umidi o secchi, secondo le stagioni e l'andamento delle piogge. Le specie utilizzate saranno scelte tenendo conto delle fioriture e dell'aspetto durante tutte le stagioni.

### 4.3.3 Serbatoi d'accumulo

Rispetto al contesto iniziale, è prevista l'introduzione di due unità di stoccaggio della risorsa idrica utile per il supporto della prevista vegetazione. In particolare, sono stati progettati un serbatoio interrato e una cisterna, da cui verrà prelevata acqua da fornire rispettivamente alle piante del tetto verde e a quelle della serra aeroponica, secondo programmate necessità.

#### 4.3.3.1 Serbatoio interrato

Come riportato all'interno del Capitolato di tale progetto, nella corte dell'ostello, verrà interrata una vasca monoblocco in C.A. di cui la figura 4.9 riporta pianta e sezioni:

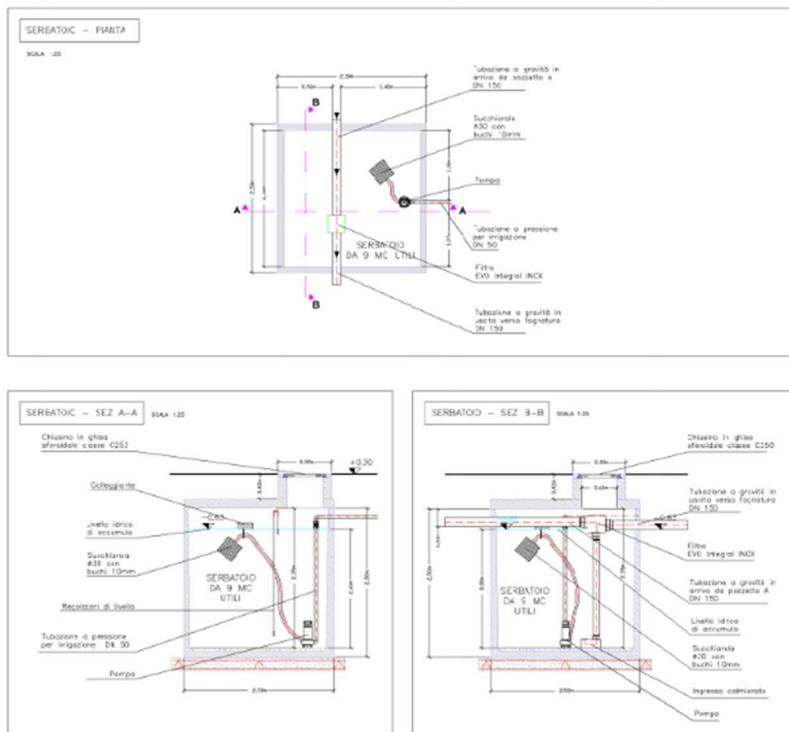


Figura 4.9- Pianta e sezioni serbatoio interrato- Planimetria di progetto

Il serbatoio, come visibile in figura 4.2, riceve l'acqua dal pozzetto che cattura il flusso di una serie di pluviali esistenti che lavorano su una porzione di tetto avente superficie pari a circa 230 m<sup>2</sup>. A livello geometrico, si presenta come un cubo avente i lati pari a 250 cm, ma con una capacità di stoccaggio prevista di circa 9 m<sup>3</sup>; l'accumulo in eccesso fluirà all'interno di un condotto direttamente collegato all'esistente rete fognaria. Dal fondo della vasca verrà prelevata dell'acqua da un'elettropompa ad immersione collegata a una condotta in pressione la cui destinazione finale è data dagli irrigatori del giardino pensile. Sempre all'interno del

Capitolato, sono riportate le modalità con cui il serbatoio è stato dimensionato. In particolare, in accordo con la norma **E DIN 1989-1: 2000-**

**12, il dimensionamento di una vasca alla raccolta di acque meteoriche dipende da due fattori:**

- **L'apporto netto di acqua piovana**, funzione della precipitazione, dell'area e del coefficiente di deflusso del bacino che alimenta il serbatoio.
- **Il fabbisogno d'acqua di servizio.**

Il minore tra i due parametri si utilizzerà nel calcolo del volume del serbatoio. Nello specifico, il fabbisogno è stato stimato essere pari a circa 130000 l/anno, mentre la resa della pioggia assume un valore pari a circa 225000 l/anno, ricavato dalla formula [30], che segue:

$$R = S (m^2) \times V_p (l/m^2/anno) \times V_t \quad [30]$$

in cui:

- S è la superficie proiettata della porzione di tetto interessata;
- $V_p$  è il valore medio di precipitazione cumulata annuale valutato considerando i dati di pioggia che vanno dal 2009 al 2019.
- Infine,  $V_t$  è il coefficiente di deflusso della copertura, posto pari a 0,8.

Per il calcolo del volume del serbatoio, dunque si è utilizzato il valore del fabbisogno idrico annuale, secondo l'equazione [12]:

$$V = F_c(l) \times k \quad [31]$$

In cui k è una costante posta pari a 0,0625 e  $F_c$ , fattore di calcolo, è il minore tra i valori di resa della pioggia e fabbisogno idrico. In tal caso assume il valore di 130000 litri.

#### 4.3.3.2 Cisterna

A ridosso della serra adibita a coltura aeroponica, si collocherà una piccola cisterna, le cui dimensioni si riportano in figura 4.10, avente un volume di stoccaggio pari a 350 litri.

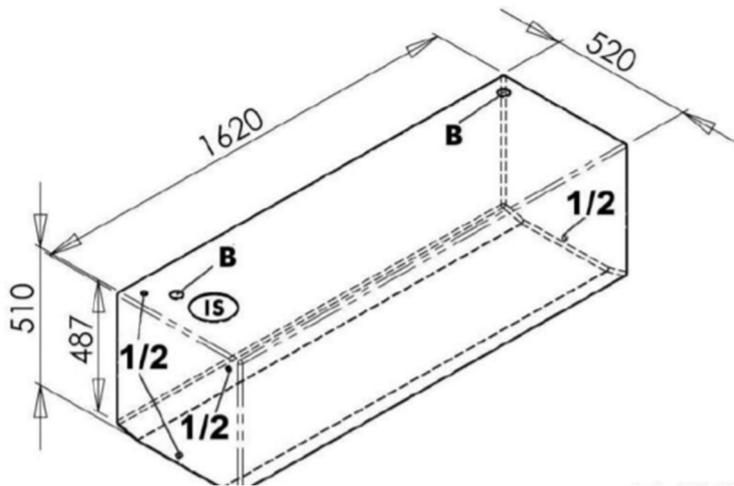


Figura 4.10- Rappresentazione grafica cisterna per aeroponica- Capitolato di progetto

Il suo dimensionamento ha seguito le stesse direttive già viste nel caso del serbatoio interrato. La cisterna in questione alimenterà la vasca master dell'impianto di aeroponica. Sarà posizionata strategicamente sulla superficie del tetto verde e avrà lo stesso rivestimento pensato per le panchine dello stesso luogo, che risponderà al duplice compito di proteggere e mascherare la stessa.

### 4.3.4 Budget

Il budget definito per tale intervento, ammontante in totale a 57.160 €, stando a quanto riportato all'interno della Relazione Intermedia del progetto, è stato diviso nel seguente modo:

- 18.000 € per l'attrezzatura;
- 39.160 € per infrastrutture e opere.

## 4.4 Impatto atteso

L'intervento è mirato a indurre certi impatti, sempre indicati nel documento relativo alla Valutazione Intermedia, di seguito elencati:

1. Adattamento ai cambiamenti climatici e miglioramento della resilienza agli eventi meteorologici estremi, mediante un aumento della ritenzione idrica del sistema a scapito dei processi di runoff;
2. Valorizzare i servizi offerti da ecosistemi e NbS;
3. Migliorare qualità dell'aria e del microclima;
4. Fornire sistemi di raccolta e riutilizzo delle acque meteoriche;
5. Generare consapevolezza e impegno tra i cittadini, e migliorare le attuali politiche di governance.

# Capitolo 5

## Costruzione del modello su SWMM

Il seguente capitolo è volto alla descrizione dei passaggi e dei settaggi considerati nell'ambito della modellazione del sistema idraulico oggetto di studio su SWMM. Dopo aver introdotto i parametri assegnati alle varie componenti della rete, si passerà a un'illustrazione dei dati pluviometrici e atmosferici impostati. Infine, saranno resi noti i parametri con cui sono state modellate le unità LID di progetto. Il tutto sarà riferito ad entrambi gli scenari pre- e post-intervento pilota. Le figure 5.1 e 5.2 mostrano la modellazione della rete di drenaggio costruita in SWMM per entrambi gli scenari.

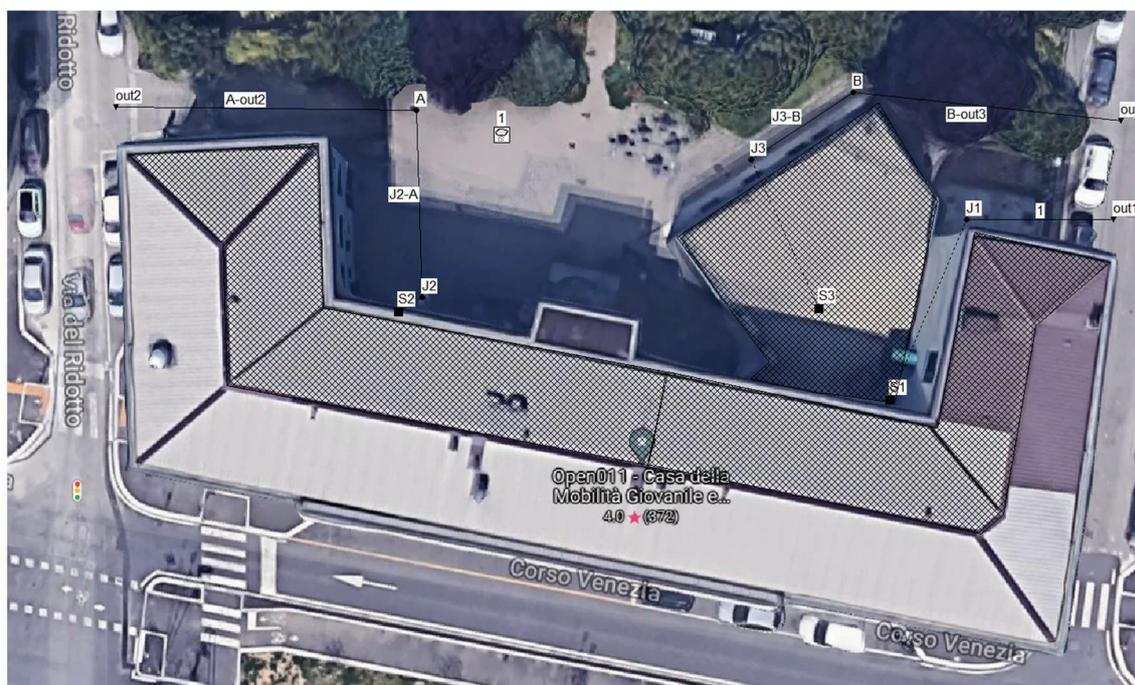


Figura 5.1- Modello SWMM relativo allo scenario pre-intervento pilota



Figura 5.2- Modello SWMM relativo allo scenario post-intervento pilota

## 5.1. Modellazione oggetti rete di drenaggio

Tale paragrafo è dedicato alla descrizione dei parametri assegnati ai vari elementi costituenti la rete di drenaggio.

### 5.1.1. Costruzione modello per scenario pre-intervento pilota

Per la costruzione del modello pre-intervento si è fatto riferimento alla planimetria di progetto (figura 4.2). Ulteriori considerazioni relative ai collegamenti tra rete fognaria e pluviali serventi certe porzioni di copertura, hanno portato alla suddivisione della stessa in tre diversi *subcatchments*, ciascuno dei quali collegato a una singola *junction*, anziché considerarne una per ogni pluviale esistente. Le varie *junctions* sono state collegate tra

loro o ai nodi fognari (*outfalls*) tramite condotte circolari con flusso a superficie libera. Le dimensioni geometriche delle componenti in gioco sono state ricavate dai documenti di progetto a disposizione nell'ambito della stesura di tale tesi o, in caso di mancate indicazioni, sono state ipotizzate e poste uguali a misure plausibili e generalmente assegnate ai suddetti elementi. Le seguenti tabelle riassumono i parametri più significativi con cui sono stati modellati i vari oggetti della rete, la cui nomenclatura è coerente con quanto riportato in figura 5.1, per lo scenario pre-intervento.

Parametri e caratteristiche assegnati agli elementi della rete di drenaggio (scenario pre-intervento)						
Subcatchments	Area [m <sup>2</sup> ]	Larghezza equivalente [m]	Pendenza [%]	Area impermeabile [%]	Rain gage	Outlet
S1	109,2	5	4	100	1	J1
S2	231.2	32	4	100	1	J2
S3	179	15	2	100	1	J3
Junctions	Quota del fondo [m]	Profondità massima [m]	-	-	-	-
J1	4	0,5	-	-	-	-
J2	4,5	0,88	-	-	-	-
A	4,4	0,88	-	-	-	-
J3	4,4	0,5	-	-	-	-
B	4,3	0,5	-	-	-	-
Conduits (circular)	Nodo d'ingresso	Nodo d'uscita	Diametro [m]	Lunghezza [m]	Scabrezza (coefficiente di Manning)	Pendenza [%]
J1-out1	J1	out1	0,3	10	0,01	1
J2-A	J2	A	0,4	10	0,01	1
A-out2	Area [m2]	out2	0,4	10	0,01	1
J3-B	J3	B	0,3	10	0,01	1
B-out3	B	out3	0,3	5	0,01	1
Outfalls	Quota [m]	Condizioni di uscita	Elemento ricevente il flusso	-	-	-
out1	3,9	FREE	Fognatura	-	-	-
out2	4,3	FREE	Fognatura	-	-	-
out3	4,25	FREE	Fognatura	-	-	-

Figura 5.3- Tabella riassuntiva dei parametri assegnati agli elementi della rete di drenaggio per lo scenario pre-intervento

### 5.1.2. Costruzione modello per scenario post-intervento

La modellazione della rete di drenaggio post-intervento ha seguito gli stessi principi descritti nel paragrafo immediatamente precedente. Tale scenario, oltre all'inserimento delle unità LID che verrà discusso più avanti, vede l'introduzione di due serbatoi di stoccaggio e due condotte in pressione aventi il compito di pompare dalle unità di stoccaggio l'acqua necessaria per l'irrigazione del tetto verde e dell'aeroponica. Inoltre, il nodo fognario associato al *subcatchment S1* è stato dismesso in quanto l'acqua proveniente dalla suddetta porzione di tetto, viene ora indirizzata verso un piccolo serbatoio che va ad alimentare il sistema irriguo della coltura aeroponica. Il troppo pieno di tale cisterna, invece, è scaricato direttamente sul manto del giardino pensile. La figura 5.4 riassume le caratteristiche assegnate a ciascun elemento della rete relativamente, appunto, allo scenario post-intervento pilota. Al sottobacino ospitante il *rain garden*, pur essendo permeabile nella realtà, si è assegnata una percentuale di area impermeabile pari al 100% in quanto la presenza dell'unità LID ne va ad annullare tutte le caratteristiche precedentemente assegnate, per cui tale settaggio risulta superfluo ai fini dei calcoli operati da SWMM.

Parametri e caratteristiche assegnati agli elementi della rete di drenaggio (scenario post-intervento)								
Subcatchments	Area [m <sup>2</sup> ]	Larghezza equivalente [m]	Pendenza [%]	Area impermeabile [%]	Rain gage	Outlet	-	-
S1	109,2	5	4	100	1	J1	-	-
S2	231,2	32	4	100	1	J2	-	-
S3	179	15	2	100	1	J3	-	-
S4	6	1	0	100	1	tr_pieno	-	-
Junctions	Quota del fondo [m]	Profondità massima [m]	-	-	-	-	-	-
J1	4	0,5	-	-	-	-	-	-
J2	4,5	0,88	-	-	-	-	-	-
A	4,4	0,88	-	-	-	-	-	-
J3	5,2	0,5	-	-	-	-	-	-
tr_pieno	4,4	0,5	-	-	-	-	-	-
B	4,3	0,5	-	-	-	-	-	-
Conduits (circular)	Nodo d'ingresso	Nodo d'uscita	Diametro [m]	Lunghezza [m]	Scabrezza (coefficiente di Manning)	Pendenza [%]	Inlet offset [m]	Outlet offset [m]
J1-Se_piccolo	J1	Se_piccolo	0,3	4	0,01	1	0	1
Se_piccolo-TrPi_aero	Se_piccolo	TrPi_aero	0,4	5	0,01	1	1	0
J2-A	J2	A	0,4	10	0,01	1	0	0
A-Se_grande	A	Se_grande	0,4	1	0,01	1	0	2
Se_grande-out2	Se_grande	out2	0,4	5	0,01	1	2	0
J3-in_rg	J3	in_rg	0,4	5	0,01	1	0	0
tr_pieno-B	tr_oieno	B	0,4	10	0,01	1	0	0
B-out4	B	out4	0,4	10	0,01	1	0	0
Outfalls	Quota [m]	Condizioni di uscita	Elemento ricevente il flusso	-	-	-	-	-
aer	0	FREE	Serra aeroponica	-	-	-	-	-
TrPi_aero	3,91	FREE	S3 (tetto verde)	-	-	-	-	-
out2	4,34	FREE	Fognatura	-	-	-	-	-
irr	8	FREE	S3 (tetto verde)	-	-	-	-	-
in_rg	5,15	FREE	S4 (rain garden)	-	-	-	-	-
out4	4,2	FREE	Fognatura	-	-	-	-	-
Pumps	Nodo d'ingresso	Nodo d'uscita	Tipologia flusso	Portata [l/s]	Portata [l/gg]	-	-	-
aero	Se_piccolo	aer	Costante	0,000463	40	-	-	-
pompa	Se_grande	irr	Costante	0,743667	357	-	-	-
Storage Units	Quota del fondo [m]	Profondità massima [m]	Area della base [m <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	-
Se_piccolo	2,96	1	1	-	-	-	-	-
Se_grande	2,39	2	4,5	-	-	-	-	-

Figura 5.4- Tabella riassuntiva dei parametri assegnati agli elementi della rete di drenaggio per lo scenario post-intervento

A proposito delle condotte in pressione *aero* e *pompa* modellate per simulare i sistemi di irrigazione di progetto, la prima pompa è stata costruita in modo da garantire, secondo quanto specificato all'interno del *Capitolato di progetto*, una portata costante per un volume cumulato giornaliero pari a 40 litri. La seconda pompa, invece, è incaricata di riversare 357 litri al giorno sul giardino pensile. In particolare, tale volume deve essere scaricato sul tetto verde in soli otto minuti. All'interno di tale intervallo temporale la portata della pompa è stata assunta costante. Per far entrare in funzione la pompa per soli 8 minuti al giorno, è stato necessario scrivere poche righe di codice per assegnare tale regola all'elemento in questione. Di seguito, la figura 5.5 riporta il codice appena citato.

```

RULE pompa
IF SIMULATION CLOCKTIME < 00:08:01
THEN PUMP pompa STATUS = ON
ELSE PUMP pompa STATUS = OFF

```

Figura 5.5- Script utilizzato per imporre un'accensione di otto minuti al giorno alla pompa atta all'irrigazione del tetto verde

Per quel che riguarda le due unità di stoccaggio, esse sono state modellate come serbatoi a base quadrata.

## 5.2. Inserimento dati pluviometrici

Al fine di poter fornire un quadro che sia il più completo possibile circa il rendimento idraulico delle pratiche LID contemplate dall'attuazione del progetto pilota, si è scelto di simulare la loro risposta a scenari diversi. Lo step temporale di calcolo è stato impostato pari a un minuto per tutte le diverse simulazioni. In particolare, sono state effettuate due simulazioni annuali, tre relative a eventi piovosi di durata pari a un'ora e altre tre in riferimento a eventi meteorici dalla durata di 24 ore. Inoltre, per tener conto dei cambiamenti climatici attesi dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), è stata eseguita un'ulteriore simulazione sulla base di dati pluviometrici ottenuti secondo quanto riassunto nel paragrafo 5.2.3. La figura 5.6 che segue mostra un estratto di file pluviometrico redatto per essere inserito in SWMM.

ID	Anno	Mese	Giorno	Ora	Minuto	Altezza pioggia [mm]
STA	2010	1	8	2	0	1.2
STA	2010	1	8	3	0	0.6
STA	2010	1	8	4	0	0.2
STA	2010	1	8	5	0	0.2
STA	2010	1	8	6	0	0.4
STA	2010	1	8	14	0	1.0
STA	2010	1	8	15	0	1.0
STA	2010	1	8	16	0	0.2
STA	2010	1	9	9	0	0.2
STA	2010	1	9	10	0	2.0
STA	2010	1	9	11	0	2.6
STA	2010	1	9	12	0	1.2

Figura 5.6- Estratto del file di precipitazione relativo ai dati di precipitazione registrati dalla stazione di Torino, via della consolata per l'anno 2010

### 5.2.1. Simulazioni annuali

Per questo tipo di simulazioni, si è scelto di riferirsi a un anno particolarmente secco e uno particolarmente piovoso, in modo da testare le LID in ciascuna di queste due situazioni. I dati pluviometrici sono stati scaricati direttamente tramite il portale di Arpa Piemonte, e sono riferiti alla stazione pluviometrica più vicina all'Open011, ossia quella di Torino, via della consolata. I dati rilasciati da ARPA hanno risoluzione temporale pari a un'ora. Per l'anno secco si è scelto di scaricare i dati relativi al 2017, durante il quale è stata registrata una precipitazione annuale cumulata di soli 473 mm, ben inferiore a quella che è la media torinese, che si attesta intorno ai 1000 mm; per l'anno umido si sono scaricati dati relativi al 2010, in cui è stata registrata l'altezza cumulata maggiore degli ultimi anni, pari a 1360 mm.

## 5.2.2. Simulazioni per eventi orari e giornalieri con TR di 2, 10 e 50 anni

Sempre passando per il portale di Arpa Piemonte, è possibile consultare l'Atlante delle piogge intense. Tale atlante, inserite le coordinate del luogo di interesse, restituisce una tabella (visibile in figura 5.15) che associa una certa altezza di pioggia cumulata in funzione del tempo di ritorno e della durata dell'evento piovoso. Avendo scelto di effettuare tre simulazioni orarie e altrettante giornaliere, sono stati creati opportuni ietogrammi costanti coerenti con le altezze di pioggia indicate dall'atlante.

## 5.2.3 Simulazione annuale per scenari di cambiamento climatico

Le serie temporali utilizzate per effettuare le simulazioni per scenari di cambiamento climatico sono state fornite dal Prof. Jost von Hardenberg. Tali serie hanno risoluzione temporale di 3 ore e riportano valori di precipitazione cumulata in mm nelle 3 ore precedenti l'ora indicata, e abbracciano un periodo che va dal 1850 al 2014. Dopodichè, si dipartono 3 scenari SSP (Share Socioeconomic Pathways) 126, 245 e 585, rispettivamente molto ottimistico, moderato ed estremo. Il Prof. von Hardenberg ha provveduto ad epurare opportunamente le serie fornite dai biases, in modo che le medie annuali nel periodo che va dal 1971 al 2000 risultassero uguale alle medie registrate a Torino nello stesso lasso temporale, ossia 872,1 mm/anno. Gli scenari considerati, stabiliti dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), sono stati simulati da 16

modelli diversi, le cui previsioni partono dal 2015 fino ad arrivare al 2100. Nell'ambito della presente tesi, si è scelto di andare a ricercare gli anni con i valori di precipitazione massima e minima per ciascuno dei 16 modelli considerati. I file annuali ottenuti in tal modo, grazie all'ausilio di Excel, a partire dalle serie originali, sono stati utilizzati come input in SWMM. Dai risultati ottenuti per ciascun modello, si è effettuata una media, con relativa deviazione standard, sulla base di cui sono stati partoriti gli opportuni commenti e analisi. In definitiva, considerando lo scenario più catastrofico, ossia l'SSP585, che contempla un aumento della radiazione netta sulla superficie terrestre di  $8,5 \text{ W/m}^2$  per il 2100, si sono ricavati degli output sotto forma di media e deviazione standard, indicativi delle prestazioni su scala annuale delle unità LID previste dal progetto pilota CWC, sia per l'anno più secco che per quello più piovoso. Precisamente, i valori cumulati annuali di precipitazione per l'anno più piovoso e per quello meno piovoso, sono rispettivamente di  $1252 \pm 132,2 \text{ mm}$  e di  $500,2 \pm 31,6 \text{ mm}$ .

### 5.3 Inserimento dati di evapotraspirazione

Di fondamentale importanza per la buona riuscita della simulazione si è rivelata l'assegnazione dei valori di evapotraspirazione agli elementi interni alla mappa di studio. In particolare, da ricerche bibliografiche circa l'evapotraspirazione mensile propria dei giardini pensili, sono stati assegnati i valori giornalieri di evapotraspirazione riportati in figura 5.7.

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
0.17	0.42	1.16	1.75	3.1	4.33
Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
5	4.5	2.8	1.5	0.6	0.2

Figura 5.7- Valori di evapotraspirazione assegnati ai subcatchments e alle LID inseriti nel modello SWMM (redazione autonoma)

## 5.4 Modellazione unità LID

L'inserimento e la modellazione delle unità LID in SWMM si opera mediante la sezione *LID Controls*. In tale ambito, i parametri di progetto non espressamente indicati dal *Capitolato*, sono stati ricavati dalla consultazione di documenti atti alla guida nella progettazione delle unità considerate e dagli *Help* forniti dallo stesso software SWMM in cui è suggerito un range di valori plausibili per ciascuna grandezza.

### 5.4.3 Modellazione rain garden

Il progetto pilota CWC attuato presso l'Open011 prevede la costruzione di un *rain garden* di 6 m<sup>2</sup> avente uno strato drenante costituito da un conglomerato avente alta porosità e conducibilità idraulica, e uno strato di stoccaggio a contatto con il terreno esistente che permette la percolazione

dei volumi stoccati nel terreno sottostante. La modellazione di un *rain garden* su SWMM, però, non contempla la presenza dello strato di stoccaggio, motivo per cui, in tale ambito, il *rain garden* di progetto è stato modellato come una *bio-retention cell*. La figura 5.8 riporta le varie finestre da utilizzare in SWMM per l'assegnazione delle caratteristiche fisiche associate a ciascuno strato da cui è composta una *bio-retention cell*.

The figure displays three screenshots of the SWMM software interface, each showing a different layer configuration for a bio-retention cell. Each window has tabs for 'Surface', 'Soil', 'Storage', and 'Drain'.

- Surface Layer Window:**
  - Berm Height (in. or mm): 100
  - Vegetation Volume Fraction: 0.15
  - Surface Roughness (Mannings n): 0.0
  - Surface Slope (percent): 0.0
- Soil Layer Window:**
  - Thickness (in. or mm): 200
  - Porosity (volume fraction): 0.5
  - Field Capacity (volume fraction): 0.18
  - Wilting Point (volume fraction): 0.07
  - Conductivity (in/hr or mm/hr): 1200
  - Conductivity Slope: 39
  - Suction Head (in. or mm): 48
- Storage Layer Window:**
  - Thickness (in. or mm): 2000
  - Void Ratio (Voids / Solids): 0.4
  - Seepage Rate (in/hr or mm/hr): 100
  - Clogging Factor: 0

Figura 5.8- Definizione caratteristiche layers per bio-retention cell (redazione autonoma)

In particolare, nella finestra relativa allo strato superficiale sono stati definiti:

- **Berm Height:** rappresenta il livello massimo che l'acqua può raggiungere prima che si verifichi il trabocco. Poiché il progetto reale prevede un pozzetto di troppo pieno con bocca rialzata di 10 cm rispetto al fondo vasca, a tale parametro è stato assegnato un valore pari, appunto, a 100 mm.
- **Vegetation Volume Fraction:** è la frazione di volume ricoperta dagli steli e dalle foglie della vegetazione. In ottemperanza al suggerimento di SWMM, che propone un valore compreso tra 0,1 e 0,2, si è scelto un valore intermedio pari a 0,15.

- *Surface Roughness*: rappresenta il numero di Manning che regola il deflusso superficiale. Nel caso di *rain garden*, si pone pari a 0.
- *Surface Slope*: è la pendenza dello strato superficiale del giardino, in tal caso posto pari a 0.

Per quanto riguarda lo strato di suolo, esso ha necessitato della definizione delle seguenti grandezze:

- *Thickness*: è lo strato di suolo immediatamente sotto la superficie. Il progetto pilota prevede, per tale layer, l'inserimento di circa 20 cm di pietrame di diametro compreso tra i 3 e i 7 cm.
- *Porosity*: indica la porosità del materiale costituente tale strato. Per quel diametro granulare è indicato di considerare una porosità di circa 0,5.
- *Field Capacity*: è la capacità di ritenzione idrica del terreno in relazione al volume totale del terreno che si ha a drenaggio ultimato. Si è settato un valore pari a 0,18.
- *Wilting Point*: rappresenta il minimo contenuto d'acqua (legata al processo di adsorbimento) di un terreno completamente asciutto.
- *Conductivity*: è la conducibilità del terreno saturo. Nell'ambito di tale modellazione si è utilizzato un valore di 1200 mm/h, molto a favore di sicurezza.
- *Conductivity Slope*: è la pendenza della curva logaritmica della conducibilità rispetto al contenuto di umidità. SWMM propone valori compresi tra 30 e 60, per cui si è utilizzato un valore medio pari a 45.
- *Suction Head*: valore medio della suzione capillare che interessa il fronte umido.

Infine, lo strato di stoccaggio è stato definito come segue:

- *Thickness*: è lo spessore dello strato di stoccaggio. Fisicamente, tale layer spessore di 80 cm e area di 15 m<sup>2</sup>, ma poiché SWMM non consente di impostare superfici diverse per i diversi strati di una stessa unità LID, al fine di non alterare il volume di stoccaggio previsto, si è settato uno spessore di 2000 mm.
- *Void Ratio*: è il volume dei pori rispetto al volume solido, che SWMM suggerisce di porre pari a un valore compreso tra 0,5 e 0,75.
- *Seepage Rate*: è la velocità con cui l'acqua dello strato di stoccaggio si infila nel terreno naturale sottostante. Per la tipologia di sottosuolo presente nella zona in cui si ubica l'Open011, tale parametro assume valori compresi tra 25 e 100 mm/h. Si è adottato un valore di 100 mm/h. Poiché, come già sottolineato, su SWMM lo strato di stoccaggio si interfaccia al terreno sottostante per un'area 2,5 volte inferiore a quella reale, le simulazioni effettuate è come se si riferissero a un valore di *seepage rate* pari a 40 mm/h.
- *Clogging Factor*: rappresenta il fattore di intasamento, in tal caso posto pari a 0.

## 5.4.2 Modellazione green roof

Gli strati costituenti il *tetto verde* previsto dal progetto sono stati modellati secondo i parametri mostrati in figura 5.9.

Surface	Soil	Drainage Mat
Berm Height (in. or mm)	40.0	
Vegetation Volume Fraction	0.15	
Surface Roughness (Mannings n)	0.2	
Surface Slope (percent)	1.0	

Surface	Soil	Drainage Mat
Thickness (in. or mm)	250	
Porosity (volume fraction)	0.6	
Field Capacity (volume fraction)	0.26	
Wilting Point (volume fraction)	0.07	
Conductivity (in/hr or mm/hr)	900	
Conductivity Slope	50	
Suction Head (in. or mm)	100	

Surface	Soil	Drainage Mat
Thickness (in. or mm)	25	
Void Fraction	0.5	
Roughness (Mannings n)	0.4	

Figura 5.9- Definizione caratteristiche layers per green roof (redazione autonoma)

In tal caso i parametri per il layer superficiale sono stati settati coerentemente con i suggerimenti di SWMM, mentre quelli relativi allo strato di suolo derivano direttamente da documenti relativi al progetto pilota CWC.

Per quanto riguarda il tappetino drenante, costituito da un profilato in PVC atto allo stoccaggio e all'allontanamento del fluido percolato dai layers superiori, i parametri settati sono i seguenti:

- *Thickness*: è lo spessore di tale strato, realmente pari a 25 mm.
- *Void Fraction*: è il volume di vuoti rispetto al volume totale. I valori tipici variano tra 0,5 e 0,6.
- *Roughness*: in tal caso, pur essendo il PVC un materiale molto liscio a cui si associa un n di Manning pari a circa 0,01, SWMM suggerisce valori compresi tra 0,1 e 0,4. Ciò ha senso in quanto la geometria di tale elemento risulta molto ostica per il flusso idrico.

# Capitolo 6

## Analisi e discussione dei risultati

La sezione corrente mira a una descrizione degli output di interesse per ciascuna simulazione effettuata su SWMM. Oltre a una parte descrittiva degli output considerati come significativi e di come essi sono stati ricavati, si potranno visualizzare grafici e tabelle riassuntive e comparative tra scenario pre- e post-intervento pilota.

### 6.1 Output significativi

Oltre agli output di natura idraulica da ricavare elencati nel paragrafo 4.4, in tale sede si è ritenuto opportuno fare ulteriori considerazioni finalizzate a fornire un quadro idraulico che possa essere il più esaustivo possibile. In particolare, si farà riferimento alle seguenti grandezze:

- Per quanto riguarda le simulazioni annuali:
  1. Percentuale di acqua piovana ricadente sulla porzione di tetto che alimenta la cisterna per l'irrigazione dell'aeroponica;
  2. Percentuale di acqua piovana ricadente sulla porzione di tetto che alimenta il serbatoio per l'irrigazione del tetto verde;
  3. Percentuale di acqua raccolta in più dal sottobacino ospitante il *tetto verde* rispetto allo scenario pre-intervento;

4. Percentuale di acqua raccolta dal sottobacino ospitante il *rain garden* rispetto al totale ricaduto sull'intero bacino, e relativa percentuale infiltrata nel sottosuolo esistente;
  5. Percentuale di acqua piovana mandata in fognatura per ciascun sottobacino rispetto ai volumi dello scenario pre-progetto pilota.
  6. Percentuale acqua evapotraspirata dalla vegetazione del giardino pensile.
- In merito alle simulazioni effettuate per singoli eventi, si considerano i seguenti output:
    1. Coefficiente di runoff del *tetto verde*;
    2. Picco della portata al nodo d'arrivo in fognatura;
    3. Percentuale acqua mandata in fognatura rispetto allo scenario pre-intervento;
    4. Grafici inerenti alla laminazione della portata attuata dalle unità LID.

## 6.2 Risultati per simulazioni annuali

Il presente paragrafo si pone l'obiettivo di esplicitare, tramite grafici e tabelle comparative, i risultati ottenuti dalle simulazioni annuali effettuate in SWMM.

### 6.2.1 Simulazione anno secco (2017)

Si riportano, nelle seguenti figure, grafici e tabelle riassuntive dei risultati significativi ricavati per i vari *subcatchments* per quanto concerne la simulazione annuale rispondente al 2017.

		Subcatchments (Simulazione annuale- anno secco- 2017)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume riutilizzato per aeroponica [m <sup>3</sup> ]	Volume totale indirizzato verso il <i>tetto verde</i> [m <sup>3</sup> ]
S1	Scenario attuale	473.4	51.6	48	0	0
	Progetto CWC	473.4	51.6	0.16	12.7	35
	Confronto	-	-	-99%	-	-

Figura 6.1- Parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 1, relativi alla simulazione per l'anno 2017

In merito al *subcatchment 1*, l'intervento pilota CWC ne ha profondamente mutato l'assetto idraulico. Infatti, da uno scenario in cui la precipitazione trattata dallo stesso veniva indirizzata da una serie di pluviali verso collettori collegati all'esistente nodo fognario, si è passati a uno schema che prevede di stoccarla in un piccolo serbatoio atto all'irrigazione dell'aeroponica. Il troppo pieno di tale cisterna, anziché essere mandato in fognatura, viene riversato sul manto del giardino pensile. Allo stesso tempo, l'acqua in eccesso del *tetto verde* è inviata al *rain garden*, che ha il compito di infiltrarne il più possibile. Nuovamente, il troppo pieno del *rain garden* è inviato in fognatura. Poiché l'acqua trattata da questa unità LID proviene dai *subcatchments 1 e 3*, facendo un bilancio idraulico proporzionale per il nodo di ingresso in fognature (*out4*), è stato possibile calcolare la voce "Volume totale al nodo fognario" per lo scenario "Progetto CWC" per il *subcatchment 1* riportata in figura 6.1. È subito possibile intuire come il 99% in meno di acqua inviata in fognatura per il *subcatchment 1* sia un risultato molto positivo. Inoltre, i 12,7 m<sup>3</sup> raccolti e riutilizzati per l'irrigazione dell'aeroponica risultano essere l'**87%** del fabbisogno annuale. In altre

parole, è necessario avvalersi di una fonte d'emergenza per l'irrigazione dell'aeroponica in soli 47 giorni all'anno. Considerando che il 2017 è stato un anno davvero molto secco, in cui interi mesi sono stati totalmente secchi, è possibile concludere che il sistema pensato e attuato in sede di progetto pilota CWC risulti molto efficiente.

		Subcatchments (Simulazione annuale- anno secco- 2017)			
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]
S2	Scenario attuale	473.4	109	102	0
	Progetto CWC	473.4	109	11.8	96
	Confronto	-	-	-88%	-

Figura 6.2- Parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 2, relativi alla simulazione per l'anno 2017

Il *subcatchment 2*, prima dell'intervento pilota, scaricava direttamente in fognatura. Lo scenario post-intervento, invece, prevede che venga alimentato un serbatoio per l'irrigazione del *tetto verde*. Il troppo pieno di tale serbatoio, finirà in fognatura. Secondo la modellazione effettuata in SWMM, i cui risultati sono riportati in figura 6.2, il nuovo schema consente di ridurre dell'88% il volume idrico immesso in fognatura. In tal caso, poi, con i 96 m<sup>3</sup> stoccati e riutilizzati per l'irrigazione del tetto verde, si riesce a sopperire al **74%** del fabbisogno idrico annuale del giardino pensile.

In figura 6.3, si mostra un grafico che riproduce l'andamento del flusso idrico (in l/s) in corrispondenza del nodo fognario collegato al *subcatchment 2*. Interessante notare che, per lo scenario post-intervento (andamento blu), solo per pochi giorni all'anno il runoff di tale porzione di tetto va ad alimentare la fognatura.

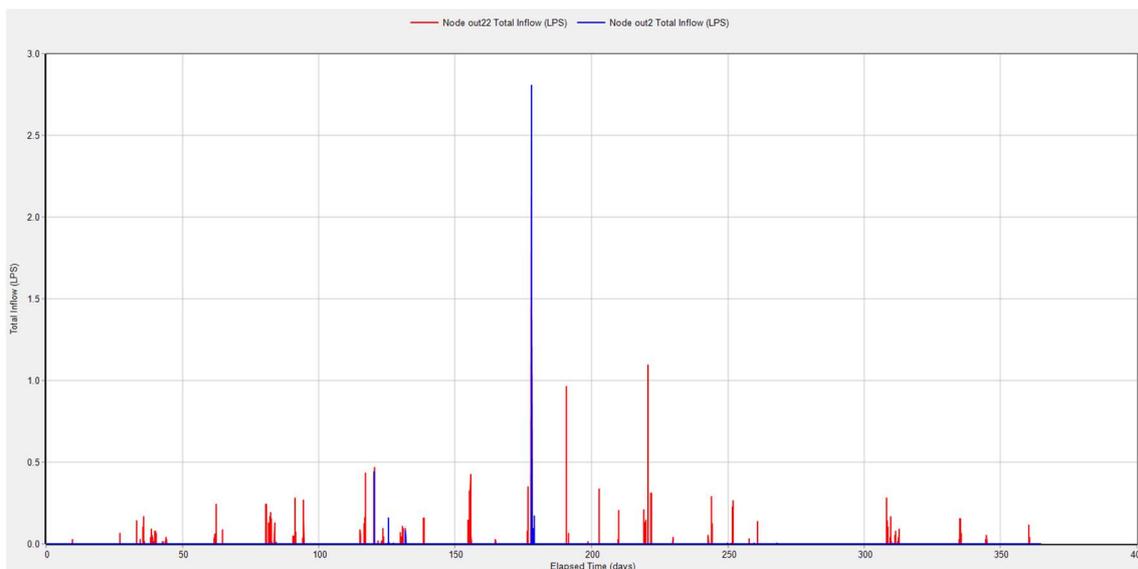


Figura 6.3- Confronto grafico dei flussi idrici (pre- e post-intervento) che interessano il nodo fognario per il subcatchment 2, relativi alla simulazione per l'anno 2017 (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

		Subcatchments (Simulazione annuale- anno secco- 2017)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Acqua totale trattata [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]
S3	Scenario attuale	473.4	85	85	79.1	31
	Progetto CWC	473.4	85	215	0.4	684
	Confronto	-	-	150%	-99%	2000%

Figura 6.4- Parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 3, relativi alla simulazione per l'anno 2017

La figura 6.4 mostra i risultati ottenuti per il *subcatchment 3*, quello ospitante il *tetto verde*. Pur trattando il 150% di acqua in più, tale sottobacino, riesce comunque, con l'ausilio del *rain garden*, a far arrivare più del 99% in meno di acqua in fognatura. Inoltre, la presenza della vegetazione produce un aumento sostanziale in merito all'evapotraspirazione. Ciò, oltre a un miglioramento puramente idraulico (acqua in meno in fognatura), produce un miglioramento del microclima della zona circostante, comportando un raffrescamento atmosferico utile per la mitigazione delle cosiddette "isole di calore".

La seguente figura 6.5 mostra un grafico relativo all'andamento dell'evapotraspirazione prima e dopo l'intervento pilota CWC.



Figura 6.5- Confronto grafico dell'andamento dell'evapotraspirazione (pre- e post-intervento) che interessa il subcatchment 3, relativi alla simulazione per l'anno 2017 (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

Prestazioni tetto verde e rain garden (Simulazione annuale- anno secco- 2017)				
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [m <sup>3</sup> ]
<b>Tetto verde</b>	<b>214,8</b>	<b>0,372</b>	-	<b>122,4</b>
<b>Rain garden</b>	<b>82,2</b>	<b>0,008</b>	<b>80</b>	<b>1,86</b>

Figura 6.6- Parametri riassuntivi delle prestazioni di tetto verde e rain garden, relativi alla simulazione per l'anno 2017

La figura 6.6 mostra i risultati che riassumono le prestazioni delle due unità LID installate nell'ambito del progetto pilota CWC. Si nota come il *rain garden* riesca a infiltrare nel sottosuolo naturale ben il **97%** dell'acqua totale ricevuta. Un altro dato interessante è quello relativo al coefficiente di runoff del *tetto verde* che, per la simulazione relativa al 2017, si attesta intorno a un valore pari a 0,37. Ciò significa che solo il **37%** della precipitazione ricevuta dal sottobacino ospitante il giardino pensile viene evacuata sottoforma di scorrimento superficiale e indirizzata, in tal caso, verso il *rain garden* che, a sua volta, ne allontana verso la fognatura solo lo **0,8%**. Volendo effettuare un bilancio globale, considerando che l'anno 2017 ha portato una precipitazione totale ammontante a circa 251 m<sup>3</sup> al bacino studiato, di cui solamente 13 m<sup>3</sup> prendono la strada della fognatura

esistente, si può affermare che l'attuazione del progetto CWC ha portato a una riduzione del volume totale instradato verso la fognatura di ben il **95%**.

In figura 6.7, infine, si può osservare l'andamento dell'infiltrazione e dello scorrimento superficiale che interessa il *rain garden*.

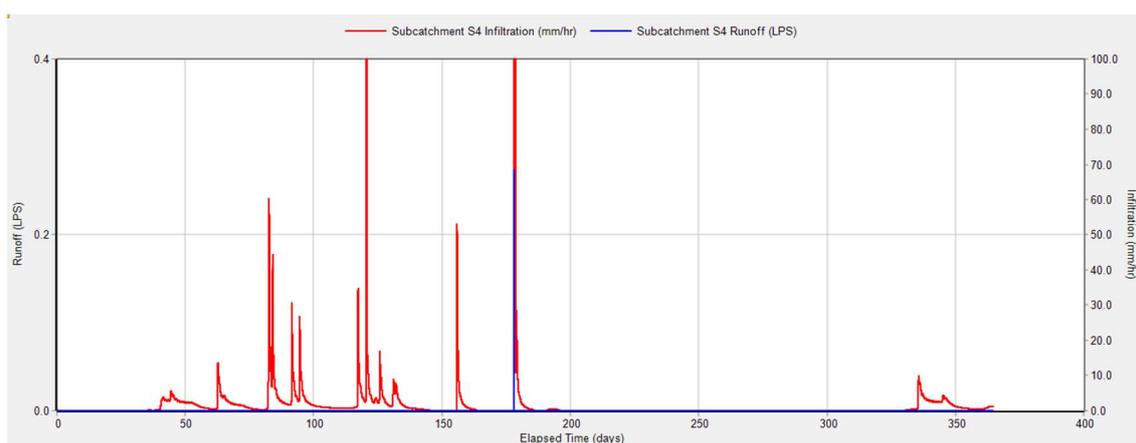


Figura 6.7- Confronto andamento deflusso superficiale e infiltrazione per il rain garden, relativamente alla simulazione annuale per il 2017

## 6.2.2 Simulazione anno molto piovoso (2010)

Nuovamente, si riportano, nelle seguenti figure, grafici e tabelle riassuntive dei risultati significativi ricavati per i vari *subcatchments* per quanto concerne la simulazione annuale rispondente al 2010.

		Subcatchments (Simulazione annuale- anno piovoso- 2010)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume riutilizzato per aeroponica [m <sup>3</sup> ]	Volume totale indirizzato verso il tetto verde [m <sup>3</sup> ]
S1	Scenario attuale	1359.5	148.2	142	0	-
	Progetto CWC	1359.5	148.2	6.65	14.3	127
	Confronto	-	-	-95%	-	-

Figura 6.8- Parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 1, relativi alla simulazione per l'anno 2010

La figura 6.8 riassume i risultati ottenuti per il *subcatchment 1*. In tal caso, pur aumentando la percentuale di acqua inviata in fognatura rispetto alla

simulazione effettuata per l'anno secco, si nota un volume maggiore stanziato e riutilizzato per l'irrigazione dell'aerponica. In tal caso, infatti, si riesce a soddisfare il fabbisogno idrico della serra aerponica per il **98%** dei giorni dell'anno.

		Subcatchments (Simulazione annuale- anno piovoso- 2010)			
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]
S2	Scenario attuale	1359.5	314	301	0
	Progetto CWC	1359.5	314	166	140
	Confronto	-	-	-45%	-

Figura 6.9- Parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 2, relativi alla simulazione per l'anno 2010

La figura 6.9 mostra i risultati relativi al *subcatchment 2*. Rispetto all'anno secco, in tal caso, essendo il serbatoio pieno per più giorni, spesso esso è stato by-passato dalle acque meteoriche, per cui l'acqua spedita al nodo fognario è ridotta di solo il 45% rispetto allo scenario pre-intervento. In compenso, il volume totale stanziato e riutilizzato per l'irrigazione del giardino pensile riesce ad alimentare la vegetazione per il **100%** dell'anno.

Il grafico in figura 6.10 mostra l'andamento del flusso al nodo fognario collegato al *subcatchment 2*. Da notare come per neanche un giorno all'anno la curva rossa (relativa allo scenario post-intervento) si attesti a un valore più alto rispetto alla curva blu, risultando, pertanto, non distinguibile. Ciò indica che l'inserimento del serbatoio riesce anche a laminare la portata indirizzata verso la fognatura, alleggerendo il carico a cui i collettori fognari sono sottoposti.

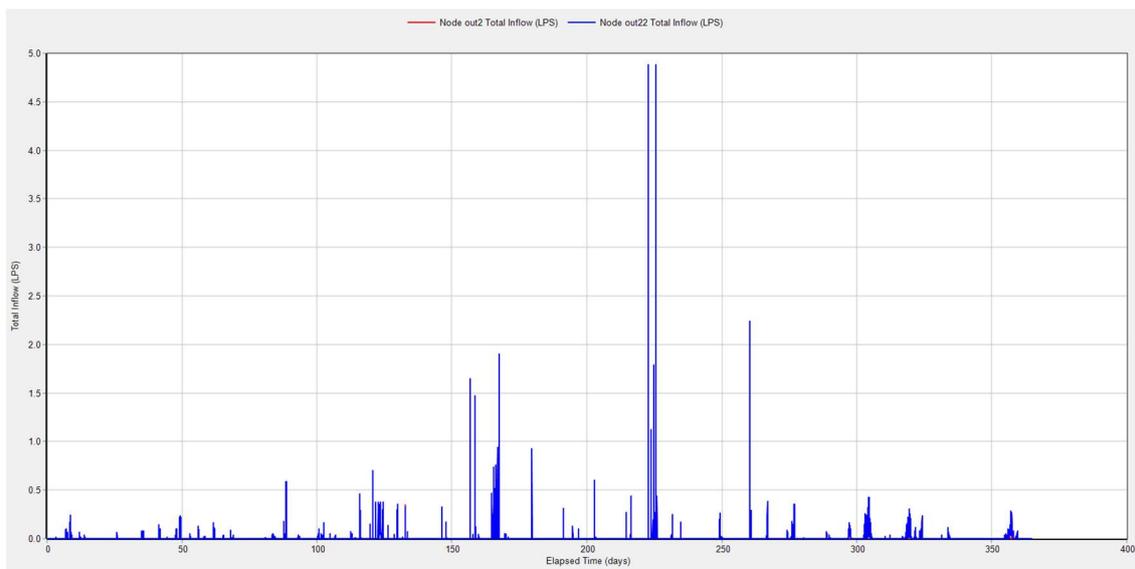


Figura 6.10- Confronto grafico dei flussi idrici (pre- e post-intervento) che interessano il nodo fognario per il subcatchment 2, relativi alla simulazione per l'anno 2010 (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

		Subcatchments (Simulazione annuale- anno piovoso- 2010)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Acqua totale trattata [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]
S3	Scenario attuale	1359.5	243	243	232	62
	Progetto CWC	1359.5	243	505	13	721
	Confronto	-	-	107%	-94%	1130%

Figura 6.11- Parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 3, relativi alla simulazione per l'anno 2010

Per quanto riguarda il sottobacino ospitante il giardino pensile, in tal caso tratta il 107% di acqua in più rispetto allo scenario pre-intervento riuscendo, comunque, a indirizzarne verso la fognatura ben il 94% in meno. Nuovamente, come mostrato in figura 6.11, l'aumento dell'evapotraspirazione operato dalla vegetazione (in figura 6.12 si mostra l'andamento di tale grandezza prima e dopo l'intervento CWC) produce benefici a livello sia idraulico che climatico.

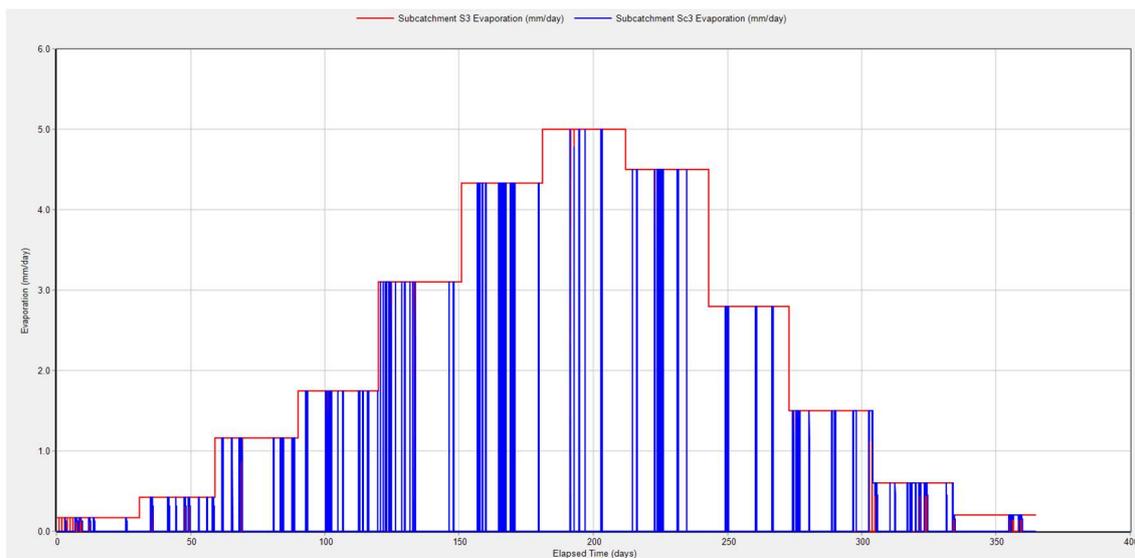


Figura 6.12- Confronto grafico dell'andamento dell'evapotraspirazione (pre- e post-intervento) che interessa il subcatchment 3, relativi alla simulazione per l'anno 2010 (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

Prestazioni tetto verde e rain garden (Simulazione annuale- anno piovoso- 2010)				
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [m <sup>3</sup> ]
<b>Tetto verde</b>	<b>501,2</b>	<b>0,719</b>	-	<b>129,1</b>
<b>Rain garden</b>	<b>370,8</b>	<b>0,072</b>	<b>343,2</b>	<b>1,5</b>

Figura 6.13- Parametri riassuntivi delle prestazioni di tetto verde e rain garden, relativi alla simulazione per l'anno 2010

La figura 6.13 riassume le prestazioni delle unità LID per la simulazione relativa a un anno molto piovoso (2010 nello specifico). Il *rain garden* riesce a infiltrare il **92%** del volume totale trattato, mandandone in fognatura solo il **7%**. Per quanto riguarda il coefficiente di runoff del *tetto verde*, esso è pari a circa 0,7. Tale valore ha senso in quanto lo strato di terreno dello stesso è spesso sottoposto a condizioni di saturazione durante un anno così piovoso, per cui non si riesce a trattenere molto volume durante tali scenari e, di conseguenza, l'eccesso è stanziato e drenato dal tappetino drenante posizionato al di sotto dello strato di terreno. A livello globale, l'anno 2010

ha visto il riversamento sull'intero bacino studiato di circa **721 m<sup>3</sup>** di acqua meteorica. Di questi, **190 m<sup>3</sup>** hanno trovato la via della fognatura, ossia il **74%** in meno rispetto a quanto accadeva prima dell'intervento.

La figura 6.14 mostra l'andamento dell'infiltrazione e dello scorrimento superficiale che interessa il *rain garden*.

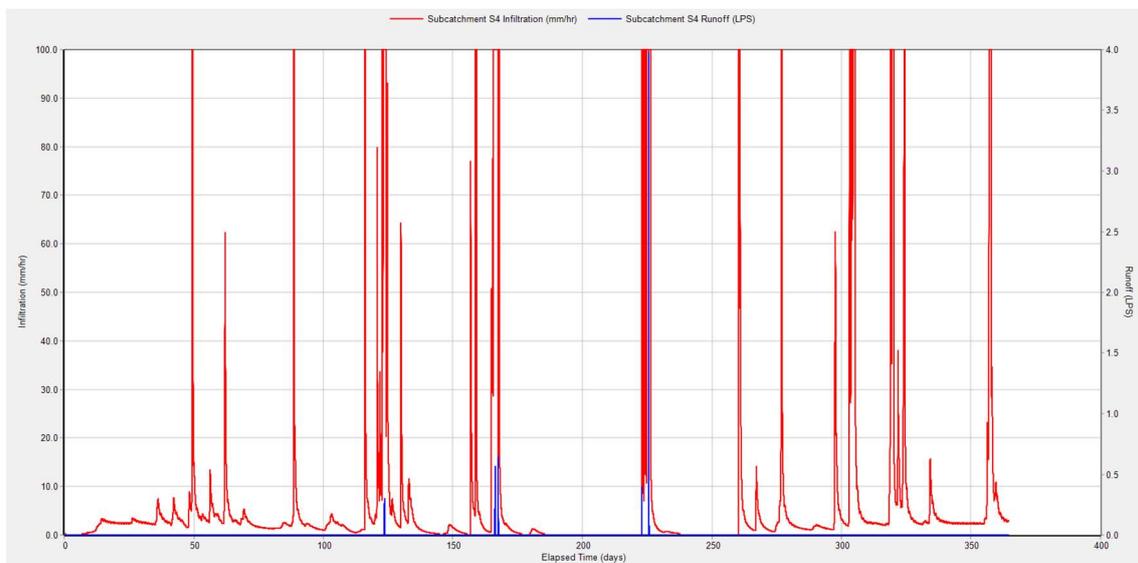


Figura 6.14- Confronto andamento deflusso superficiale e infiltrazione per il rain garden, relativamente alla simulazione annuale per il 2010

## 6.3 Risultati per simulazioni per singolo evento

La corrente sezione ha lo scopo di esplicitare i risultati ritenuti maggiormente significativi, figli delle simulazioni operate per eventi di durata oraria e giornaliera aventi tempi di ritorno di 2, 10 e 50 anni. In particolare, le simulazioni effettuate per gli eventi di durata oraria, sono state impostate con una lunghezza temporale di 110 ore (4 giorni e mezzo), mentre per

quelle riguardanti eventi di durata giornaliera, si protraggono per 6 giorni e 6 ore. Rispetto alle simulazioni annuali, si è cambiato punto di vista e si ha dato maggiore importanza e significatività a quelle che sono le prestazioni delle unità LID nei confronti di eventi meteorici circoscritti, volendone evidenziare le capacità di ritenzione e laminazione.

### 6.3.1 Simulazione per evento orario con TR=2 anni

La seguente figura (6.15) evidenzia i risultati ottenuti relativamente alle prestazioni di *rain garden* e *tetto verde* dalla simulazione per evento piovoso orario con tempo di ritorno pari a 2 anni.

Prestazioni tetto verde e rain garden (Evento orario con TR=2 anni)						
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]	Portata di picco al nodo fognario [l/s]	Volume totale in fognatura [m <sup>3</sup> ]
<i>Tetto verde</i>	9,5	0,024	-	19,6	-	-
<i>Rain garden</i>	0,4	0	0	18,2	-	-
Scenario attuale	5,4	0,992	-	0,28	1,47	5,3

Figura 6.15- Parametri riassuntivi le prestazioni delle unità LID per simulazione per evento orario con TR=2 anni

Come si evince dalla tabella, il *tetto verde* tratta il **76%** di acqua in più rispetto a quanto accadeva allo stesso sottobacino che lo ospita prima dell'intervento pilota. Nonostante tale aspetto, per precipitazioni relativamente deboli, come l'evento considerato in tale sezione, il giardino pensile riesce a trattenere gran parte dell'acqua riversata sul proprio manto, come dimostra il valore del coefficiente di runoff a esso associato, che si attesta intorno a 0,024 (solo il **2,4%** del volume trattato viene smaltito sotto forma di scorrimento). Nuovamente, si osserva come il radicale aumento dell'evapotraspirazione possa rappresentare una caratteristica

importante al fine di conseguire un certo comfort termico durante i mesi più caldi.

Per quanto riguarda le prestazioni del *rain garden*, l'acqua trattata dall'unità è troppo poca per poterne analizzare il comportamento. Essendo comunque associato al *rain garden* un coefficiente di deflusso pari a 0, nel caso di evento orario con TR=2 anni, si può affermare che il sistema *tetto verde-rain garden* è in grado di trattenere la totalità dell'acqua piovana, evitando che vengano mandati in fognatura oltre 5 m<sup>3</sup> di acqua per una portata di picco di quasi 1,5 l/s. Si riduce così il rischio di mandare in crisi il sistema fognario (anche solo per un breve periodo di tempo e in maniera circoscritta) e, contemporaneamente, si traggono benefici anche sotto altri aspetti (raffrescamento aria, maggiore biodiversità, invarianza idraulica).

In figura 6.16 si mostra un grafico in cui vengono confrontati gli andamenti dei runoff associati al *subcatchment 3* per entrambi gli scenari pre- e post-intervento pilota CWC.

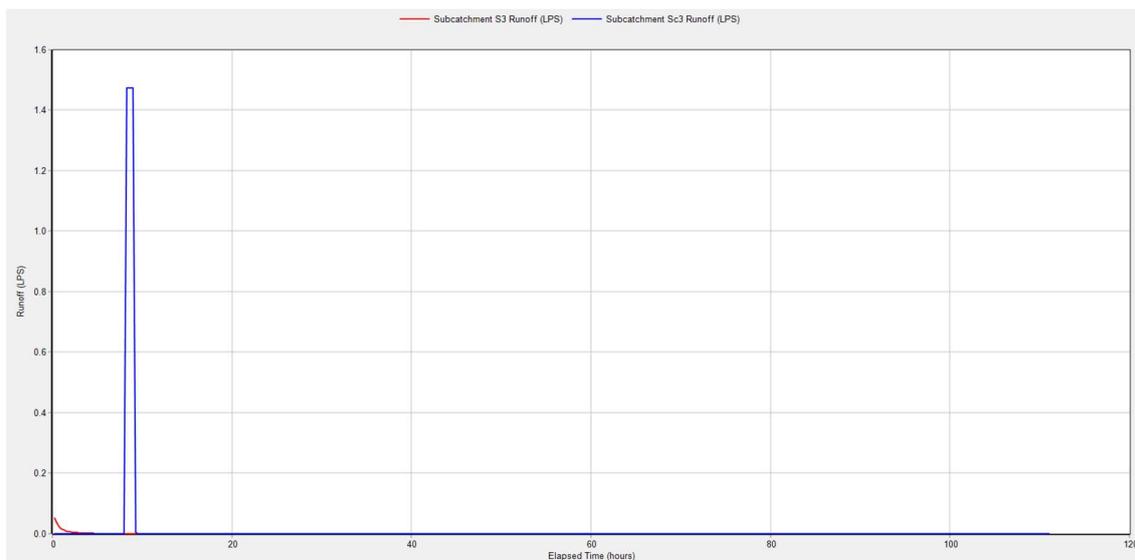


Figura 6.16- Confronto tra il runoff associato al subcatchment 3 per scenari pre- e post-intervento, simulazione oraria con TR=2 anni (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

### 6.3.2 Simulazione per evento orario con TR=10 anni

Si illustrano in figura 6.17 i risultati relativi alle prestazioni delle unità LID per evento piovoso di durata oraria e tempo di ritorno pari a 10 anni per il punto geografico in cui ricade l'ostello Open011.

Prestazioni tetto verde e rain garden (Evento orario con TR=10 anni)						
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]	Portata di picco al nodo fognario [l/s]	Volume totale in fognatura [m <sup>3</sup> ]
Tetto verde	14,3	0,033	-	22,7	-	-
Rain garden	0,74	0	0,19	4,6	-	-
Scenario attuale	8,3	0,995	-	0,32	2,31	8,29

Figura 6.17- Parametri riassuntivi le prestazioni delle unità LID per simulazione per evento orario con TR=10 anni

Rispetto alla simulazione precedente, in tal caso, cambia ben poco. Infatti, a parte un logico incremento dei volumi trattati, i coefficienti di runoff dei vari sottobacini si attestano a valori del tutto simili a quelli visti per simulazione oraria con TR=2 anni.

In figura 6.18, si può vedere l'andamento della portata di runoff per il *sub 3* nei casi pre- e post-intervento. In particolare, rispetto al caso precedente, la portata di picco al nodo fognario prima dell'installazione del tetto verde è ancora superiore e il rischio di appesantire i collettori fognari aumenta.

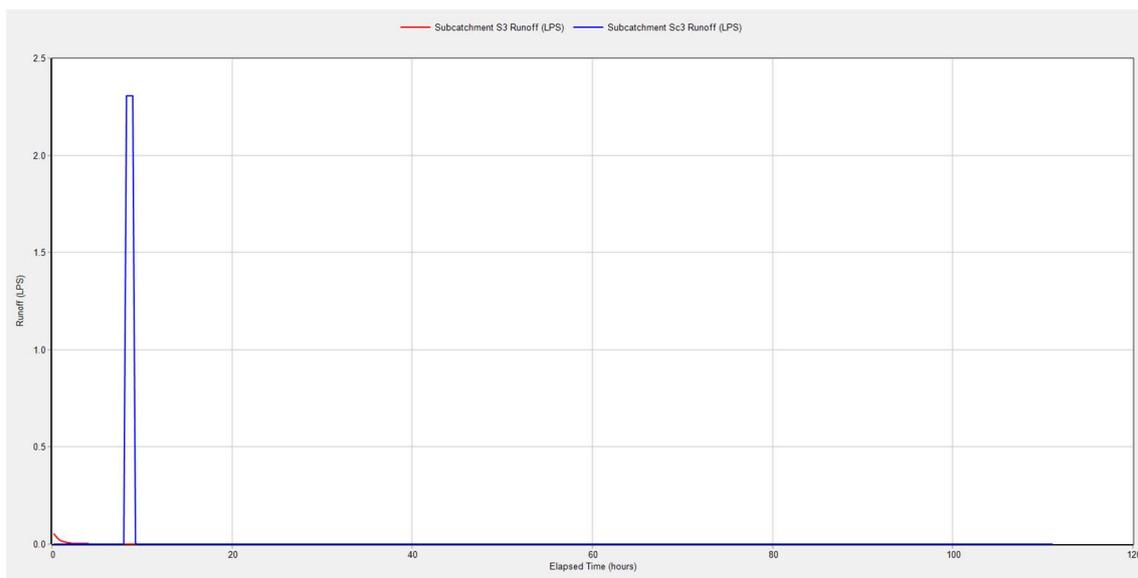


Figura 6.18- Confronto tra il runoff associato al subcatchment 3 per scenari pre- e post-intervento, simulazione oraria con TR=10 anni (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

### 6.3.3 Simulazione per evento orario con TR=50 anni

In figura 6.19 si mostrano i parametri ricavati dalla simulazione per un evento orario con TR=50 anni.

Prestazioni tetto verde e rain garden (Evento orario con TR=50 anni)						
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]	Portata di picco al nodo fognario [l/s]	Volume totale in fognatura [m <sup>3</sup> ]
<i>Tetto verde</i>	18,6	0,196	-	20,4	-	-
<i>Rain garden</i>	4	0	3,3	10	-	-
<b>Scenario attuale</b>	11	0,997	-	0,29	3,04	10,9

Figura 6.19- Parametri riassuntivi le prestazioni delle unità LID per simulazione per evento orario con TR=50 anni (redazione autonoma)

Stavolta il coefficiente di runoff del tetto verde è di circa 0,2 (comunque solo il 20% rispetto allo scenario pre-intervento, nonostante un volume idrico ricevuto maggiore di quasi il 70%), per cui per la prima volta il *rain garden* un volume non trascurabile. Le sue capacità di stoccaggio e infiltrazione, comunque, risultano sufficienti per riuscire a mantenere pari a 0 il proprio coefficiente di runoff, e andando a infiltrare, nell'arco temporale della simulazione, l'83% dell'acqua ricevuta.

Nuovamente, pur in presenza di un evento meteorico di durata oraria che ha la probabilità di verificarsi una volta ogni 50 anni, il sistema *tetto verde-rain garden* riesce a mantenere nullo l'apporto idrico in fognatura.

In figura 6.20 si mostra il confronto tra i flussi di scorrimento per il *sub 3* prima e dopo l'attuazione del progetto CWC. È interessante notare come la presenza del *green roof* riesca ad attenuare il flusso idrico ritardandone il picco. Dunque, oltre all'opportunità di mandare meno acqua in fognatura, vi è il vantaggio che tale volume si immette in fognatura con un ritardo temporale utile per consentire ai collettori la portata di piena immagazzinata durante l'evento piovoso.

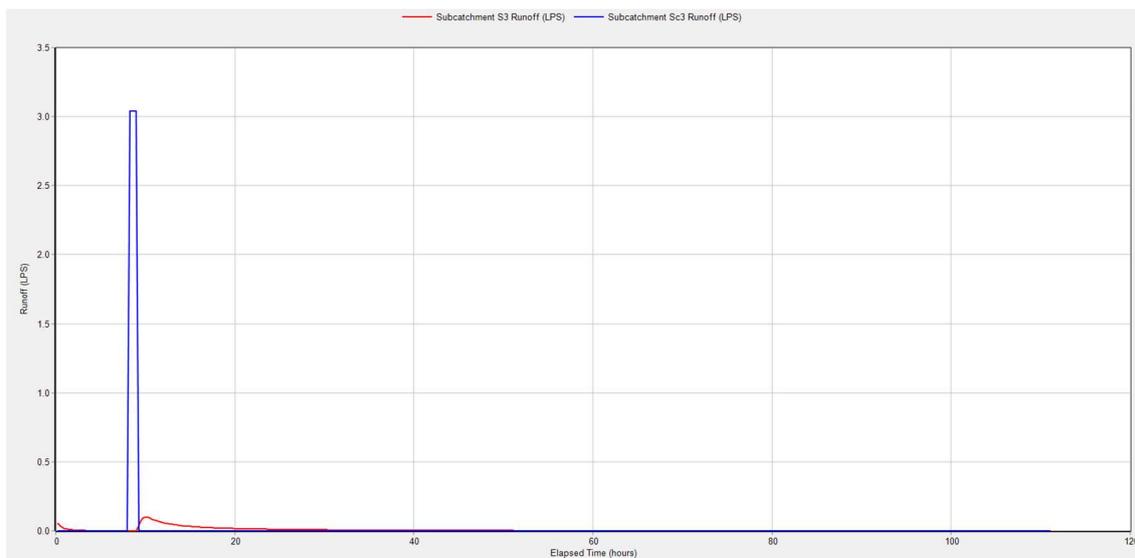


Figura 6.20- Confronto tra il runoff associato al subcatchment 3 per scenari pre- e post-intervento, simulazione oraria con TR=50 anni (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

### 6.3.4 Simulazione per evento giornaliero con TR=2 anni

La seguente figura (6.21) evidenzia i risultati ottenuti relativamente alle prestazioni di *rain garden* e *tetto verde* dalla simulazione per evento piovoso giornaliero con tempo di ritorno pari a 2 anni.

Prestazioni <i>tetto verde</i> e <i>rain garden</i> (Evento giornaliero con TR=2 anni)						
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]	Portata di picco al nodo fognario [l/s]	Volume totale in fognatura [m <sup>3</sup> ]
<i>Tetto verde</i>	17,2	0,174	-	28,4	-	-
<i>Rain garden</i>	3,9	0	3,1	11,3	-	-
<b>Scenario attuale</b>	<b>11,6</b>	<b>0,932</b>	-	<b>4,4</b>	<b>0,13</b>	<b>10,8</b>

Figura 6.21- Parametri riassuntivi le prestazioni delle unità LID per simulazione per evento giornaliero con TR=2 anni

Si può notare che il volume ricevuto, pur essendo superiore rispetto al caso di evento orario, esso si distribuisce su una finestra temporale più ampia, per cui la portata di picco associata al *subcatchment 3* pre-intervento risulta

essere molto inferiore. Dell'acqua trattata dal *tetto verde* solo il **17%** circa viene evacuata sottoforma di runoff, per cui si può nuovamente concludere, come mostrato in figura 6.22, che esso riesce ad assolvere i propri compiti di attenuazione e ritardo del flusso. Il coefficiente di runoff del *rain garden* è, ancora una volta, pari a 0, pari anche al volume idrico totale mandato in fognatura. Inoltre, quasi l'**80%** dell'acqua convogliata all'interno di tale unità si è infiltrata nel terreno sottostante, andando a ricaricare le falde esistenti.

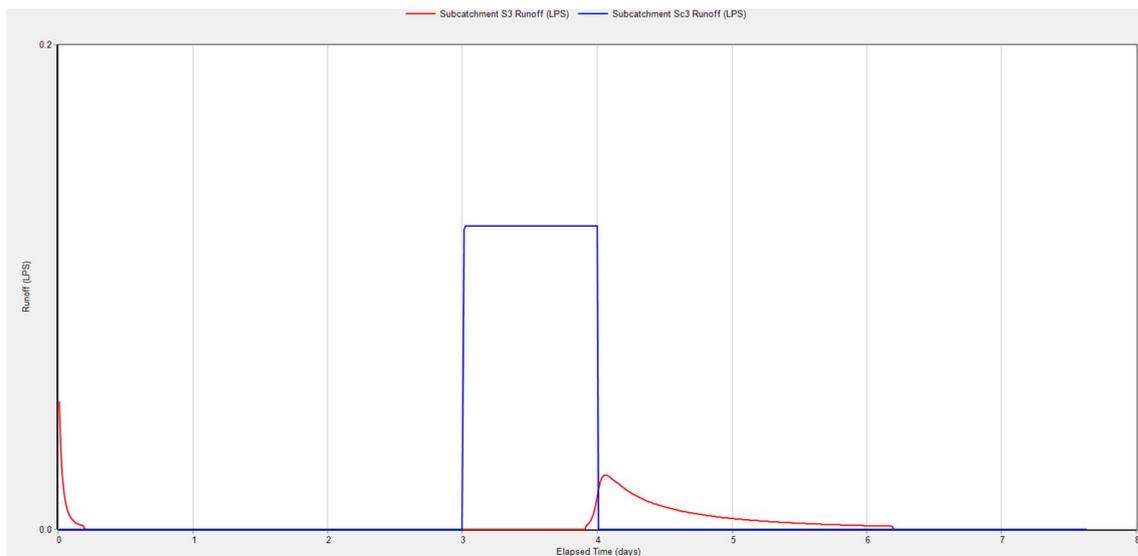


Figura 6.22- Confronto tra il runoff associato al subcatchment 3 per scenari pre- e post-intervento, simulazione giornaliera con TR=2 anni (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

### 6.3.5 Simulazione per evento giornaliero con TR=10 anni

La figura 6.23 illustra i risultati ottenuti per la valutazione delle prestazioni delle unità LID relativamente alla simulazione per evento piovoso giornaliero con TR=10 anni.

Prestazioni tetto verde e rain garden (Evento giornaliero con TR=10 anni)						
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]	Portata di picco al nodo fognario [l/s]	Volume totale in fognatura [m <sup>3</sup> ]
<i>Tetto verde</i>	30,8	0,442	-	32,8	-	-
<i>Rain garden</i>	14,2	0	13	13,9	0	0
<b>Scenario attuale</b>	<b>18,3</b>	<b>0,95</b>	<b>-</b>	<b>5,1</b>	<b>0,2</b>	<b>17,3</b>

Figura 6.23- Parametri riassuntivi le prestazioni delle unità LID per simulazione per evento giornaliero con TR=10 anni

Nuovamente, il coefficiente di runoff del *rain garden* è pari a 0. Esso è in grado di infiltrare, nell'arco temporale in cui si inserisce la simulazione, ben il **92%** dell'acqua trattata.

Per quanto riguarda il *tetto verde*, esso presenta un coefficiente di runoff pari a circa 0,44. Continua a rappresentare un ottimo primo step per la riduzione della portata in uscita. Però, trattando quasi il doppio del volume rispetto allo stesso sottobacino pre-intervento, ne espelle circa la stessa quantità. Un ulteriore svantaggio è dovuto al fatto che, una volta saturo il terreno del giardino pensile, l'acqua in eccesso viene immediatamente evacuata come runoff, portando sì a un ritardo del flusso (comunque non ottimale), ma anche a un incremento della portata in uscita, come visibile in figura 6.24.

Ad ogni modo, ancora una volta il sistema *tetto verde-rain garden* è in grado di trattenere tutto il volume idrico che una precipitazione dalla durata di 24 ore con TR=10 anni comporta.

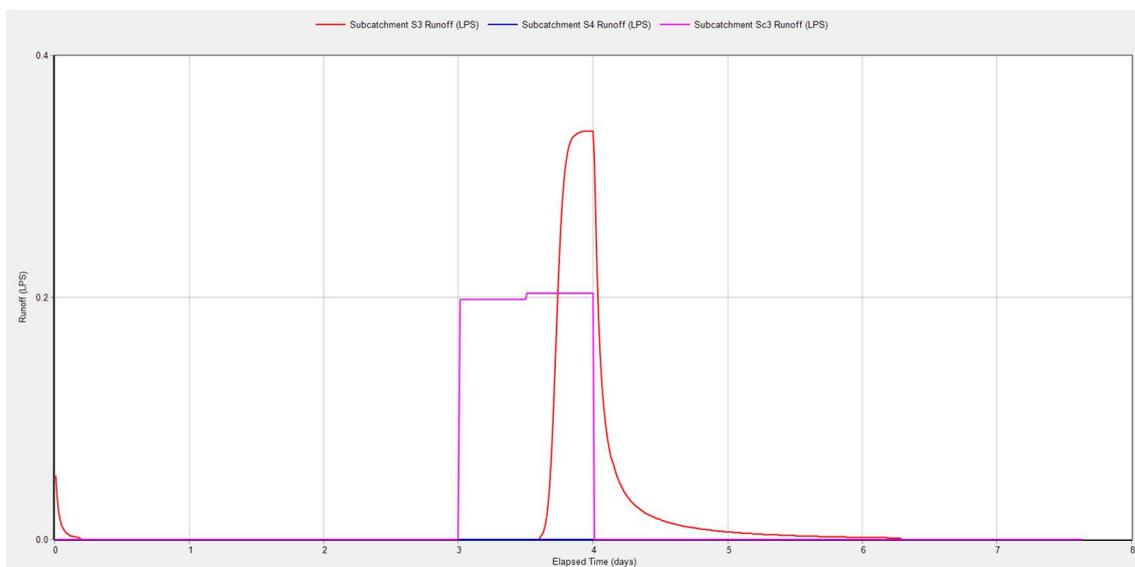


Figura 6.24- Confronto tra il runoff associato al subcatchment 3 per scenari pre- e post-intervento e al subcatchment 4 per scenario post-intervento, simulazione giornaliera con TR=10 anni (in rosso la curva relativa al subcatchment 3 per lo scenario post-intervento)

### 6.3.6 Simulazione per evento giornaliero con TR=50 anni

La figura 6.23 illustra i risultati ottenuti per la valutazione delle prestazioni delle unità LID relativamente alla simulazione per evento piovoso giornaliero con TR=50 anni.

Prestazioni tetto verde e rain garden (Evento giornaliero con TR=50 anni)						
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [mm]	Portata di picco al nodo fognario [l/s]	Volume totale in fognatura [m <sup>3</sup> ]
<b>Tetto verde</b>	40,3	0,572	-	29,6	-	-
<b>Rain garden</b>	24,2	0,301	15,6	13,8	0,28	6,67
<b>Scenario attuale</b>	24	0,966	-	4,6	0,27	23,2

Figura 6.25- Parametri riassuntivi le prestazioni delle unità LID per simulazione per evento giornaliero con TR=50 anni

Quest'ultimo scenario di simulazione considerato nel presente studio, rispetto ai precedenti, comporta delle variazioni di bilancio idrico al nodo d'ingresso in fognatura.

Partendo dalle prestazioni del *green roof*, esso presenta un coefficiente di runoff pari a 0,572 che, pur essendo il **40%** in meno rispetto allo stesso parametro relativo al *subcatchment 3* per lo scenario pre-intervento, si traduce in volumi di runoff abbastanza simili, visto che riceve quasi il doppio dell'acqua.

Stavolta, il *rain garden*, pur riuscendo a infiltrare il **65%** del volume idrico trattato, presenta un coefficiente di runoff diverso da 0 e pari a circa 0,3. Ciò si deve al fatto che, una volta saturo il volume di stoccaggio e la sottile coltre di terreno sovrastante, esso riceve un flusso in entrata più elevato rispetto alla portata che riesce a smaltire come infiltrazione nell'esistente terreno. Un problema ulteriore è rappresentato dal picco della portata di runoff associato a tale unità, che risulta, anche se di pochissimo, superiore rispetto a quello relativo al *subcatchment 3* pre-intervento. Tale aspetto è mostrato in figura 6.27. In figura 6.26, invece, tale confronto comprende anche il *tetto verde*.

Per ovviare a tale realtà, si potrebbe pensare di inserire dei dreni all'interno del volume di stoccaggio del *rain garden*, che, avendo un potenziale minore rispetto al terreno saturo, vadano ad attrarre parte del volume idrico stanziato per espellerlo secondo una portata controllata, in modo da non appesantire il sistema fognario. Un'altra alternativa potrebbe essere rappresentata dall'inserimento di un ulteriore serbatoio di laminazione ai piedi della porzione di tetto ospitante il *tetto verde*.

In definitiva, da quest'ultima simulazione si riesce a cogliere la grande capacità di ritenzione e laminazione che il sistema *tetto verde-rain garden* pensato e attuato nell'ambito del progetto pilota CWC può mettere in campo. Infatti, pur in presenza di un evento meteorico così estremo, si riesce a mandare in fognatura solo il **29%** del volume idrico che veniva immesso prima dell'intervento dal *sub 3*, nonostante un aumento dell'acqua piovana trattata di circa il **70%**.

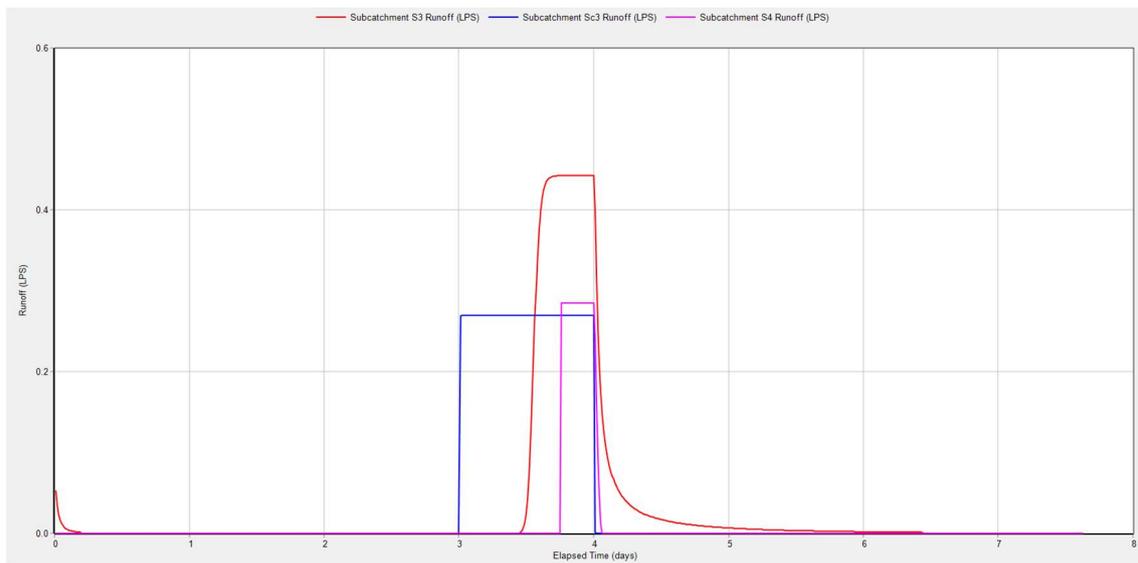


Figura 6.26- Confronto tra il runoff associato al subcatchment 3 per scenari pre- e post-intervento e al subcatchment 4 per scenario post-intervento, simulazione giornaliera con TR=50 anni (in blu la curva relativa allo scenario pre-intervento)

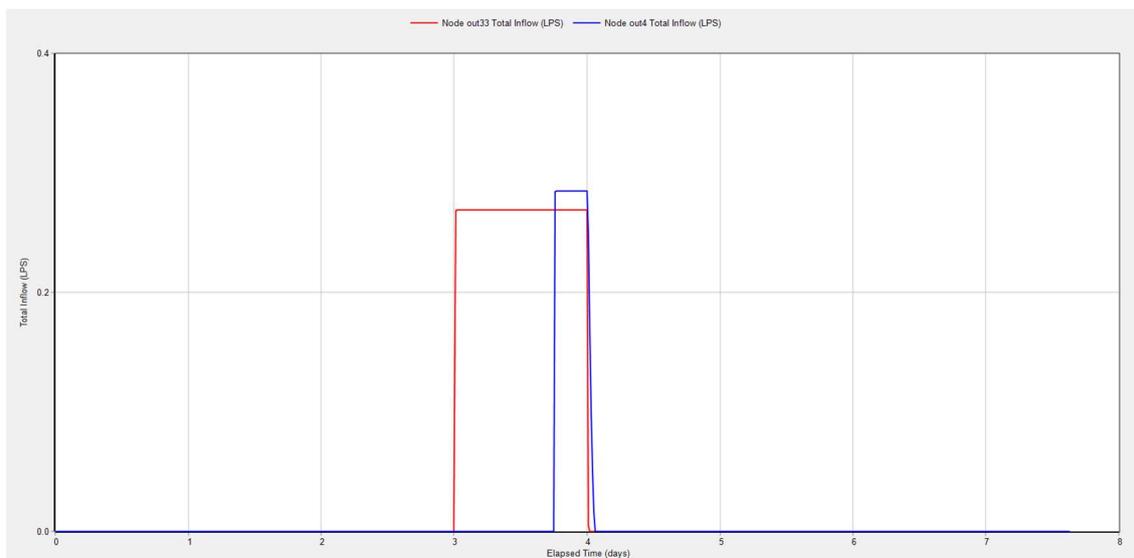


Figura 6.27- Confronto tra il flusso associato ai nodi fognari competenti al subcatchment 3 per scenario pre-intervento e al subcatchment 4 per scenario post-intervento, simulazione giornaliera con TR=50 anni

## 6.4 Risultati delle simulazioni annuali per scenari di cambiamento climatico

Nella corrente sezione saranno esplicitati e commentati i risultati derivanti dalle simulazioni basate sull'utilizzo di file pluviometrici di estensione temporale pari a un anno, opportunamente costruiti al fine di riprodurre possibili scenari di cambiamento climatico, secondo quanto suggerito dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). In particolare, le simulazioni effettuate riguardano, come già descritto nel paragrafo 5.2.3, lo scenario peggiore indicato dall'IPCC, ossia SSP585. Per ciascuno dei 16 modelli di previsione valutati, sono stati individuati l'anno di massima e di minima precipitazione. La seguente analisi si basa sulla base della media dei risultati ottenuti per ciascun modello previsionale.

## 6.4.1 Simulazione annuale per scenario SSP585 (media anni piovosi)

Si cercherà, ora, di imbastire un'analisi attendibile dei risultati ottenuti dalle simulazioni di durata pari a un anno effettuate per i 16 anni di massima precipitazione, uno per ogni modello considerato. Al fine di evitare una grossa dispersione di risultati e commenti, i risultati ottenuti dalle citate simulazioni sono stati in seguito mediati. La discussione seguente è basata proprio sulla media dei risultati ottenuti per i 16 modelli. In figura 6.28 si riportano i risultati ritenuti significativi per ciascuno dei 16 anni estrapolati, con annesse media e deviazione standard. Si può notare come i vari modelli, seppur diversi tra loro, portino a risultati abbastanza uniformi che si assestano a uno stesso ordine di grandezza.

Modello	Mazzini annuali										Precipitazione totale [mm]
	Sub 1		Sub 2		Sub 3		Sub 4				
	Volume indirizzato verso il letto verde [m³]	Tot volume raccolto e riutilizzato [m³]	Tot volume verso fognatura [m³]	Tot volume raccolto e riutilizzato [m³]	Tot vol ricevuto [m³]	Tot mm evaporati	Coeff runoff	Tot vol trattato [m³]	Tot vol infiltrato [m³]		
ACCESS-CM2	109	14.6	128	140	479.72	522	0	404	400	1315	
BCC-CM2-MR	109	14.6	140	122	457.345	625	0	342	336	1268	
BWV-CM1-1-MR	106	14.4	119	138	476.498	557	0	384	372	1300	
CMCC-SR2	125	14.4	165	135	533.73	593	0	402	390	1435	
CMCC-ESM2	105	14.5	120	135	450	570	0	354	350	1250	
EC-Earth3	149	14.6	208	138	572.8	603	0	471	466.8	1600	
EC-Earth3-VHR	100	14.4	130	135	457	580	0	360	354	1255	
GFDL-ESM4	96	14.5	99	140	456.45	505	0	360	357	1242	
ITM-ESM	92.6	14.6	92.3	140	436.76	598	0	324	321	1163	
IPSL-CM5A-LR	95	14.6	72.7	140	438.86	599	0	303	301.8	1097	
KIOST-ESM	88	14.5	90	132	438.86	536	0	316.2	314.4	1134	
MICROCES	89	14.6	83.8	140	426.02	572	0	318	316.2	1120	
MPI-ESM1-2-MR	98	14	123	120	427.07	527	0	314.1	312	1140	
MPI-ESM1-2-LR	102	14.5	112	140	461.82	595	0	349.2	346.8	1250	
MRI-ESM2-0	100	14.6	124	126	434.075	589	0	322.8	321	1180	
NECM3	104	14.5	121	136	460	572	0	355	350	1225	
Media	103.6	14.489375	119.8675	134.8125	458.563	574.0625	0	354.5625	350.375	1233.375	
Deviazione standard	15.05489593	0.1476988	31.60272684	6.385714036	38.7020485	31.8506055	0	42.13794265	40.5734421	132.178797	

Figura 6.28- Risultati ottenuti dalle simulazioni di durata annuale effettuate per ciascuno dei 16 anni di massima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

In figura 6.29 sono sintetizzati i risultati più interessanti ottenuti per il *Subcatchment 1*. Come è chiaro, gli output ricavati sono molto simili a quelli ottenuti nell'ambito della simulazione di durata annuale inerente all'anno umido, ossia il 2010 (paragrafo 6.2.2). Nella fattispecie, si riesce ora ad accumulare e a utilizzare per l'irrigazione della coltura aeroponica un

volume idrico di 14,5 m<sup>3</sup>, in grado di coprire il **99,3%** del fabbisogno idrico annuo della stessa. La rimanente frazione di acqua piovana trattata da tale *subcatchment 1*, epurata dell'aliquota di acqua evaporata, è riversata sul manto del *tetto verde*.

		Subcatchments (Simulazione annuale - SSP585_max)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]	Volume totale indirizzato verso il <i>tetto verde</i> [m <sup>3</sup> ]
S1	Scenario attuale	1253.3	136.6097	118.0307808	0	0
	Progetto CWC	1253.3	136.6097	0	14.5	104
	Confronto	-	-	-100%	-	-

Figura 6.29- Valori medi dei parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 1, relativi alla simulazione degli anni di massima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

La figura 6.30 mostra, invece, i risultati ottenuti in merito al *Subcatchment 2*. Nuovamente, si riscontra una certa somiglianza con gli output ottenuti dalla simulazione incentrata sui dati pluviometrici registrati nel 2010 dalla stazione di Via della Consolata di Torino. Rispetto a prima si riscontra, adesso, un minore volume idrico ricevuto dal bacino e una più uniforme distribuzione temporale della precipitazione. Ciò fa sì che il serbatoio d'accumulo riesca a mantenersi parzialmente vuoto per gran parte dell'anno e rimanendo disponibile ad accogliere nuova pioggia. Perciò, ora, si conta una percentuale minore di volume idrico indirizzato verso il nodo fognario. Anche in tal caso, comunque, il serbatoio riesce a fornire il **100%** del fabbisogno idrico richiesto dalla vegetazione ospitata dal *tetto verde*.

		Subcatchments (Simulazione annuale- SSP585_max)			
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]
S2	Scenario attuale	1253.3	288.259	251.938366	0
	Progetto CWC	1253.3	288.259	120	135
	Confronto	-	-	-52%	-

Figura 6.30- Valori medi dei parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 2, relativi alla simulazione degli anni di massima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

Per quanto riguarda i risultati ottenuti per il *Subcatchment 3*, essi sono riassunti in figura 6.31. Rispetto allo stato pre-intervento, il nuovo schema pensato in ambito del progetto pilota CWC produce un incremento del **105%** dell'acqua totale trattata dal sottobacino in questione. Nonostante tale aspetto, il volume indirizzato verso la fognatura si riduce del **100%**, azzerandosi completamente. In parallelo, il tasso di evaporazione cresce del **210%**, passando da un valore di 166 mm a uno di 572 mm.

		Subcatchments (Simulazione annuale-SSP585_max)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Acqua totale trattata [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario	Evapotraspirazione totale [mm]
S3	Scenario attuale	1253.3	224.3407	224.3407	194	166
	Progetto CWC	1253.3	224.3407	459	0	572
	Confronto	-	-	105%	-100%	210%

Figura 6.31- Valori medi dei parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 3, relativi alla simulazione degli anni di massima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

La figura 6.32 riassume le prestazioni delle unità LID installate, ovvero *tetto verde* e *rain garden*. Analizzando i risultati ottenuti per il *tetto verde*, esso riceve un volume idrico pari a circa **460 m<sup>3</sup>**. Di tale volume, il **74,5%** viene allontanato sotto forma di runoff. Il **22,3%** supporta i fabbisogni di evapotraspirazione. Il volume in eccesso va a finire all'interno del *rain garden*, che tratta un volume totale pari a 355 m<sup>3</sup>. Di questi ben **350,4 m<sup>3</sup>** vengono infiltrati nello strato naturale di terreno sottostante. Il sistema

formato da queste unità LID, comunque, riesce ad azzerare totalmente il volume idrico indirizzato verso il nodo fognario. A livello globale, tutto il bacino considerato riceve un volume di pioggia pari a **664,1 m<sup>3</sup>**, di cui **120 m<sup>3</sup>** prendono la strada dell'esistente sistema di drenaggio. Dunque, in tal caso, e per gli scenari di cambiamento climatico considerati, l'attuazione dell'intervento pilota CWC porterebbe a una riduzione del volume idrico immesso in fognatura di circa l'**82%**. Si può concludere che, almeno a livello di bilancio idrico, il ricorso a tecniche di drenaggio urbano sostenibile potrebbe rivelarsi un ottimo alleato nel cercare di contrastare gli effetti negativi che i cambiamenti climatici previsti potrebbero arrecare agli esistenti tessuti e sistemi di drenaggio urbani.

Prestazioni tetto verde e rain garden (Simulazione annuale-SSP585_max)				
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [m <sup>3</sup> ]
<b>Tetto verde</b>	<b>458.5</b>	<b>0.745</b>	<b>-</b>	<b>102.388</b>
<b>Rain garden</b>	<b>355</b>	<b>0</b>	<b>350.4</b>	<b>2</b>

Figura 6.32- Media dei parametri riassuntivi delle prestazioni di tetto verde e rain garden ricavati in SWMM, relativi alla simulazione degli anni di massima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

## 6.4.2 Simulazione annuale per scenario SSP585 (media anni secchi)

In questa sezione si esplicheranno i risultati ottenuti dalle simulazioni di durata pari a un anno effettuate per i 16 anni di minima precipitazione, uno per ogni modello considerato. Nuovamente, come già detto nel precedente paragrafo, l'analisi sarà svolta sulla base della media dei risultati ottenuti da

ciascuna delle 16 simulazioni effettuate. La figura 6.33 riporta proprio gli output ricavati dalle simulazioni effettuate per l'anno meno piovoso di tutti e 16 i modelli considerati, corredati di media e varianza.

Modello	Minimi annuali										Precipitazione totale [mm]
	Sub 1		Sub 2			Sub 3		Sub 4			
	Volume indirizzato verso il tetto verde [m <sup>3</sup> ]	Tot volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]	Tot volume verso fognatura [m <sup>3</sup> ]	Tot volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]	Tot vol ricevuto [m <sup>3</sup> ]	Tot mm evaporati	Coeff runoff	Tot vol trattato [m <sup>3</sup> ]	Tot vol infiltrato [m <sup>3</sup> ]		
ACCESS-CM2	33	14.6	18.9	93	220.17	567	0	141	108	549	
BCC-CM2-MR	27.8	12.4	12.6	83	155.11	533	0	88.2	85.1	481	
AWI-CM-1-1-MR	26.5	14.1	8.7	83.9	194.215	446	0	103.5	101.4	469	
CMCC-SR2	15.7	12.9	4.21	68	143.2	426	0	53.4	51	342	
CMCC-ESM2	26.1	13.1	0.6	86.4	196.9	548	0	85.2	82.8	456	
EC-Earth3	37.2	14	17.1	104	243.44	638	0	118.8	116.58	572	
EC-Earth3-Veg	36.4	13.8	19.1	96	236	510	0	134.1	132.06	586	
GFCL-ESM4	30.3	13.4	8.2	94	210.325	565	0	100.2	98.16	495	
ITM-ESM	24.8	14.3	9.9	99	227.35	666	0	97.2	94.8	546	
IPSL-CM4-IR	23.7	13.3	1.3	89	197.795	527	0	94.2	91.32	495	
KIOST-ESM	40.3	14.5	15.6	106	254.18	512	0	153	150.3	632	
MICROCES	31.4	13.7	14.2	94	202.27	523	0	97.2	94.8	501	
MPI-ESM1-2-HR	33.5	12.5	15.7	93	214.8	391	0	134.4	132.24	513	
MPI-ESM1-2-LR	21.2	11.7	2.8	75	161.1	320	0	91.2	88.8	366	
MPI-ESM2-0	29	13	10	80	200	548	0	85.2	82.8	456	
NEQWS	37.2	13.9	12.1	104	220	488	0	118.8	116.58	544	
Media	29.88125	13.5125	10.375625	89.89375	207.3021875	512.9375	0	105.975	101.73375	500.1875	
Deviazione standard	6.61326496	0.742356889	5.693124208	10.44027471	27.34183105	83.89239294	0	24.82409364	23.19637334	31.60272684	

Figura 6.33- Risultati ottenuti dalle simulazioni di durata annuale effettuate per ciascuno dei 16 anni di minima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

Le seguenti figure, 6.34, 6.35 e 6.36, mostrano i risultati ottenuti per i *subcatchment 1, 2 e 3*. In tal caso, pur avendo una precipitazione cumulata annua leggermente superiore a quella relativa al 2017 (l'anno secco considerato nel paragrafo 6.2.1), in proporzione tutti i valori considerati risultano molto simili a quelli ottenuti dall'appena citata simulazione. In particolare, del runoff del *subcatchments 1* si riesce a stanziare e riutilizzare per l'irrigazione dell'aeroponica un volume totale di acqua pari a 13,5 m<sup>3</sup>, pari al **92,5%** del fabbisogno annuo della stessa, a scapito di un totale di circa 30 m<sup>3</sup> di acqua scaricati dal troppo pieno della cisterna sul *tetto verde*. Per quanto concerne il *subcatchment 2*, il cui runoff alimenta il serbatoio collegato al sistema irriguo del *giardino pensile*, esso riesce a fornire alla vasca di raccolta un totale di 90 m<sup>3</sup> di acqua, pari a circa il **70%** del fabbisogno annuo della vegetazione ospitata dal terrazzo. Di tutta la pioggia ricevuta da tale sottobacino, solo 10 m<sup>3</sup> trovano la via della fognatura, ben **l'89%** in meno rispetto allo stato pre-intervento pilota CWC, e solo il **10%**

della precipitazione totale trattata. Dalla figura 6.36, invece, si vede come il *subcatchment 3* riceva un totale di acqua del **132%** in più rispetto allo scenario pre-intervento, riuscendo a far evapo-traspirare circa 512 mm di acqua, il **450%** in più rispetto a prima.

		Subcatchments (Simulazione annuale-SSP585_min)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]	Volume totale indirizzato verso il <i>tetto verde</i> [m <sup>3</sup> ]
S1	Scenario attuale	500.2	54.5218	44.162658	0	0
	Progetto CWC	500.2	54.5218	0	13.5	30
	Confronto	-	-	-100%	100%	100%

Figura 6.34- Valori medi dei parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 1, relativi alla simulazione degli anni di minima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

		Subcatchments (Simulazione annuale-SSP585_min)			
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario [m <sup>3</sup> ]	Volume raccolto e riutilizzato [m <sup>3</sup> ]
S2	Scenario attuale	500.2	115.046	94.3	0
	Progetto CWC	500.2	115.046	10.3	90
	Confronto	-	-	-89%	100%

Figura 6.35- Valori medi dei parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 2, relativi alla simulazione degli anni di minima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

		Subcatchments (Simulazione annuale-SSP585_min)				
		Precipitazione totale [mm]	Precipitazione totale [m <sup>3</sup> ]	Acqua totale trattata [m <sup>3</sup> ]	Volume totale al nodo fognario	Evapotraspirazione totale [mm]
S3	Scenario attuale	500.2	89.5358	89.5358	72	93
	Progetto CWC	500.2	89.5358	207	0	512
	Confronto	-	-	132%	-100%	450%

Figura 6.36- Valori medi dei parametri ricavati in SWMM per il subcatchment 3, relativi alla simulazione degli anni di minima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

In figura 6.37 sono riportati dei risultati che riassumono le prestazioni delle unità LID di progetto. Il *tetto verde* tratta 207 m<sup>3</sup> di acqua piovana, di cui circa il **50%** viene rimossa dal processo di evapotraspirazione, e circa il **49%**

allontanata sotto forma di runoff e convogliata verso il *rain garden*. Quest'ultimo tratta un volume idrico pari a 106,5 m<sup>3</sup>, riuscendo a infiltrarne circa il **96%** nel terreno esistente. Nuovamente, il suo coefficiente di runoff è pari a 0. Considerando tutti i bacini toccati dagli interventi previsti dal progetto CWC, in totale essi ricevono un volume idrico pari a **266 m<sup>3</sup>**, di cui solo **10 m<sup>3</sup>**, ovvero circa il **3,8%**, arrivano in fognatura. Si nota, quindi, una riduzione del volume idrico in ingresso in fognatura di circa il **95%** rispetto a quanto accadrebbe senza l'introduzione delle unità LID di progetto. Anche per lo scenario di cambiamento climatico discusso nel presente paragrafo, dunque, è possibile affermare che l'introduzione delle previste unità di drenaggio urbano sostenibile possa rivelarsi un'efficace contromisura agli svantaggi connessi ai cambiamenti climatici.

Prestazioni <i>tetto verde e rain garden</i> (Simulazione annuale-SSP585_min)				
	Totale acqua trattata [m <sup>3</sup> ]	Coefficiente di runoff	Infiltrazione totale [m <sup>3</sup> ]	Evapotraspirazione totale [m <sup>3</sup> ]
<i>Tetto verde</i>	207	0.489	-	103
<i>Rain garden</i>	106.5	0	102	1.5

Figura 6.37- Media dei parametri riassuntivi delle prestazioni di *tetto verde e rain garden* ricavati in SWMM, relativi alla simulazione degli anni di minima precipitazione estrapolati dai 16 modelli valutati

## 6.5 Considerazioni aggiuntive e confronto tra le simulazioni

Si ritiene opportuno segnalare che la presenza di runoff associato al sottobacino ospitante il *tetto verde* fin dai primi istanti delle simulazioni effettuate, è dovuta al fatto che allo strato di suolo dell'unità si è assegnata una percentuale di saturazione iniziale diversa da zero.

Inoltre, come si evince dalle tabelle in cui si riassumono i risultati significativi venuti fuori dalle simulazioni effettuate, il coefficiente di runoff del *tetto verde* calcolato per i singoli eventi si attesta sempre a un valore più basso rispetto a quello che gli si associa anche per la simulazione dell'anno secco. Una spiegazione di ciò è rintracciabile nel fatto che, per le simulazioni per i singoli eventi, l'apporto idrico per l'irrigazione della vegetazione non è stata considerata, mentre durante l'anno il volume idrico ricevuto dal manto del giardino pensile va a saturarne parzialmente il terreno, intaccando la capacità di ritenzione dell'unità. Inoltre, il fatto che le simulazioni per eventi singoli siano state collocate nei mesi estivi, quando l'area considerata è soggetta ad alti tassi di evaporazione, può aver aiutato il terreno del *tetto verde* ad abbassare il proprio grado di saturazione. Le simulazioni annuali, invece, contemplano per lunghi tratti bassissimi valori di evaporazione giornaliera. Di conseguenza, l'acqua ricevuta dall'unità non trova altro sfogo se non quello fornito dallo strato di drenaggio posizionato al di sotto del suolo.

Si è, dunque, provato a individuare il motivo a monte di tale discrepanza.

Rispetto ai risultati precedentemente analizzati, le simulazioni per singolo evento sono state collocate, ora, nei mesi invernali, al fine di valutare l'influenza dei valori di evapotraspirazione sui risultati delle simulazioni. Si è notato un notevole incremento del coefficiente di runoff del *tetto verde*, a scapito, come è intuibile, di un minore volume idrico evaporato. Per le simulazioni annuali, al contrario, si è assegnato il valore di evapotraspirazione estivo considerato a tutti e 12 i mesi dell'anno. Anche in tal caso si sono notati delle variazioni nei risultati molto significative, con valori di runoff molto più bassi e praticamente prossimo allo zero per la simulazione effettuata per l'anno secco, il 2017, e un notevole incremento del volume idrico evaporato. Provando, invece, a spegnere e accendere la pompa atta all'irrigazione del *tetto verde*, al fine di testarne l'influenza, non si è giunti a variazioni significative dei risultati delle simulazioni. In definitiva, si può asseverare la forte dipendenza della risposta del sistema agli eventi estremi dall'umidità pregressa all'evento, che cambia stagionalmente a causa del differente tasso di evapotraspirazione.

# Conclusioni

Il corrente documento nasce dall'opportunità offerta dal Prof. Fulvio Boano e dall'Ing. Anacleto Rizzo (IRIDRA) di poter sviluppare una tesi finalizzata alla valutazione dell'efficienza idraulica di determinate unità LID.

Si tratta, in particolare, di un *rain garden* e di un *tetto verde* previsti da un intervento pilota messo in pratica presso l'ostello Open011 di Torino, e inserito all'interno del più ampio progetto CWC (City Water Circles).

L'analisi portata avanti ha avuto lo scopo di sottolineare le prestazioni delle suddette unità in termini di capacità di laminazione e ritenzione dei volumi idrici ricevuti.

Il sistema di drenaggio considerato è stato costruito per mezzo del software SWMM, in grado di simulare il fenomeno di afflussi- deflussi e di modellare in modo semplice le unità LID previste dal progetto.

Il settaggio dei parametri da assegnare a ciascuna componente è avvenuto tenendo conto delle indicazioni riportate sui vari documenti stilati dai protagonisti dell'intervento avuti a disposizione. In assenza di istruzioni si sono inseriti parametri figli della consultazione di materiale bibliografico incentrato proprio sulla progettazione delle unità LID.

Per quanto riguarda le simulazioni per singolo evento e per interi anni, i dati pluviometrici sono stati inseriti in SWMM dopo essere stati acquisiti dal portale dedicato di ARPA Piemonte. I dati scaricati sono stati misurati dalla stazione meteorologica situata a Torino, in via della Consolata 10. I dati pluviometrici riguardanti, invece, gli scenari di cambiamento climatico

suggeriti dall'IPCC, essi sono stati forniti dal Prof. Jost von Hardenberg e opportunamente elaborati.

Dalle simulazioni effettuate, sono venuti fuori risultati che denotano ottime prestazioni del sistema di drenaggio previsto dal progetto, nonché delle unità LID inserite.

Un interessante sviluppo del presente lavoro avrebbe potuto essere un confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni e i dati realmente misurate in situ in modo da poter testare l'efficacia del modello costruito. Tale opportunità, però, non è stata attuabile in quanto non ultimati i lavori per la realizzazione dell'intervento pilota entro una data opportuna per poter considerare lo scenario appena descritto.

In definitiva, l'attuale tesi si pone come una base da consultare sia per lavori e ricerche nell'ambito del drenaggio sostenibile che per la costruzione di modelli ancora più precisi del sistema idraulico previsto dal progetto pilota.



## Bibliografia e sitografia

Anna De Simone, Tetto verde estensivo e intensivo, in "Idee Green", 12 aprile 2016  
<https://www.ideegreen.it/tetto-verde-estensivo-intensivo-73489.html>

Ashley R., Illman S., Kellagher R., Scott T., Udale-Clarke H., Wilson S., e Woods Ballard B. The SuDS Manual, C753, CIRIA, London, UK. ISBN 978-0-86017-760-9, 2015

Bayon, J.R, Charlesworth, S.M, Jato-Espino, D.; Warwick, F. Simulazioni pioggia-deflusso per valutare il potenziale dei SUDS per mitigare le inondazioni in bacini idrografici altamente urbanizzati, in "Environmental Systems Engineering", gennaio 2016.

Bresciani R., Masi F., Rizzo A., Sustainable Rainwater Management in the City: Opportunities and Solutions for the Anthropogenic Environmental Impacts Reduction and Urban Resilience Increase, in "Smart Metropolia - Przestrzenie Relacji" Publisher: Obszar Metropolitalny Gdansk-Gdynia-Sopot ul. Dlugi Targ 39/40, 80-830 Gdansk, 109-119; 978-83-65496-02-07, 2018.

Carbone M., Ferrante A. P., Frega F., Garofalo G., Nigro G., Piro P., Principato F., Modellazione idrologico-idraulica dei tetti Verdi. Castrolibero, Nuova Editoriale Bios, 2014

Che cos'è una Circular City o Città Circolare e cosa prevede?, in "sfridoo news", 15 maggio 2020  
<https://www.sfridoo.com/2020/05/15/citta-circolari/che-cose-una-citta-circolare-circular-city/>

Comune di Bologna, Linee guida sull'adozione di tecniche di drenaggio urbano sostenibile per una città più resiliente ai cambiamenti climatici, aprile 2018

[https://pdc.minambiente.it/sites/default/files/uploads/Documenti%20progetti/Linee-Guida-SUDS-Bologna\\_EIB\\_rev1.pdf](https://pdc.minambiente.it/sites/default/files/uploads/Documenti%20progetti/Linee-Guida-SUDS-Bologna_EIB_rev1.pdf)

[http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante\\_pioggia\\_webapp/](http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp/)

<http://www.arpa.piemonte.it/>

[http://www.filecciageologia.it/Download/Lezioni\\_idrogeologia/5\\_parametri\\_idrogeologici.pdf](http://www.filecciageologia.it/Download/Lezioni_idrogeologia/5_parametri_idrogeologici.pdf)

<http://www.iridra.eu/it/suds-drenaggio-urbano-sostenibile.html>

[https://elearning.unipd.it/scuolaamv/pluginfile.php/17165/mod\\_resource/content/1/IL5\\_18032014.pdf](https://elearning.unipd.it/scuolaamv/pluginfile.php/17165/mod_resource/content/1/IL5_18032014.pdf)

[https://www.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/ambiente/doc/Community/Archivio\\_lifelong\\_learning/17\\_19dic2016/PPT-Papiri.pdf](https://www.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/ambiente/doc/Community/Archivio_lifelong_learning/17_19dic2016/PPT-Papiri.pdf)

<https://www.contrattidifiume.it/export/sites/default/it/doc/news/Webinar-9-giugno-2021-Franco-Raimondi.pdf>

[https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5\\_1\\_manual\\_master\\_8-2-15.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf)

[https://opencms10.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/Life\\_Metro\\_Adapt/documenti/Soluzioni-Naturalistiche\\_Schede-Tecniche\\_Gestione-Acque\\_pub.pdf](https://opencms10.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/Life_Metro_Adapt/documenti/Soluzioni-Naturalistiche_Schede-Tecniche_Gestione-Acque_pub.pdf)

<https://www.epa.gov/water-research/green-infrastructure-modeling-toolkit>

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

[https://www.youtube.com/watch?v=lvj11TieYmw&t=5s&ab\\_channel=ContrattidiFiumeLombardia](https://www.youtube.com/watch?v=lvj11TieYmw&t=5s&ab_channel=ContrattidiFiumeLombardia)

Huber, J., Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas. Fayetteville, AR: University of Arkansas Community Design Center, 2010

Ing. Madera V., Metodo afflussi-deflussi SCS CN Curve number, 15 febbraio 2021  
<https://www.studiomadera.it/es/108-cn-curve-number>

ISPRA, Stato dell'Ambiente. Qualità dell'ambiente urbano – IX Rapporto – Focus su Acque e ambiente urbano, Tiburtini S.r.l., 2013

La Redazione, “Tetti verdi, cosa sono e che vantaggi offrono”, 13 novembre 2020

Lewis A. Rossman, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, and Wayne C. Huber (2016), Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume I – Hydrology (Revised)

Lewis A. Rossman, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, and Wayne C. Huber (2016), Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume III – Water Quality

Lewis A. Rossman, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory, and Wayne C. Huber (2017), Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume II – Hydraulics

Life Metro Adapt, Soluzioni Naturalistiche (NBS) per la città metropolitana di Milano. [https://opencms10.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/Life\\_Metro\\_Adapt/documenti/Soluzioni-Naturalistiche\\_Schede-Tecniche\\_Gestione-Acque\\_pub.pdf](https://opencms10.cittametropolitana.mi.it/export/sites/default/Life_Metro_Adapt/documenti/Soluzioni-Naturalistiche_Schede-Tecniche_Gestione-Acque_pub.pdf)

Mile High Flood District, Urban Storm Drainage Criteria Manual: Volume 3, Best Management Practices, novembre 2010

Nubifragio record su Torino: in tre ore non è mai piovuto così tanto dal 1928.

Temperatura crollata di 10 gradi, in “la Repubblica” , 22 giugno 2021

[https://torino.repubblica.it/cronaca/2021/06/22/news/ondata\\_di\\_maltempo\\_nubifragio\\_su\\_torino\\_allagamenti\\_a\\_vanchiglia\\_e\\_barriera\\_di\\_milano-307197904/](https://torino.repubblica.it/cronaca/2021/06/22/news/ondata_di_maltempo_nubifragio_su_torino_allagamenti_a_vanchiglia_e_barriera_di_milano-307197904/)

P. Bellucci, S. Isacco, C. Lanni, A. Mita, L. Peruzzi, P. Petrillo, Analisi e gestione delle acque di dilavamento stradale – Prima parte. Il progetto ANAS AcqueDiStrada: tra strato dell’arte e prospettive di sviluppo, in “Strade e Autostrade”, 9 luglio 2020 <https://www.stradeeautostrade.it/ambiente-e-territorio/analisi-e-gestione-delle-acque-di-dilavamento-stradale-prima-parte/>

Papiri S., Gestione delle acque meteoriche in ambito urbano. Controllo quantitativo e qualitativo delle acque meteoriche di dilavamento. Milano, via Rimini 34/36, 19 dicembre 2016

Planning & Research, Philadelphia Water Department, Stormwater Management Guidance Manual, Version 2.1, 10 febbraio 2014

Research and Innovation, Evaluating the impact of nature-based solutions: a handbook for practitioners. Dumitru A. e Wendling L., Bruxelles, 6 maggio 2021

Research and Innovation, Evaluating the impact of nature-based solutions: Appendix of method. Dumitru A. e Wendling L., Bruxelles, febbraio 2021

Sivakugan N., Permeability and Seepage, Capitolo 7, 2005

Tesi di laurea: Marchetta M. (Politecnico di Torino, anno accademico 2019- 2020) – Validazione del modello idraulico in SWMM della rete di drenaggio di Torino nel rione Borgo Dora – Relatore: Boano F.

Tesi di laurea: Michielan E. (Università degli studi di Padova, anno accademico 2012- 2013) – LE PIANTE DEL RAIN GARDEN DI AGRIPOLIS: VALUTAZIONE DELL' ADATTABILITA' ALLE CONDIZIONI IDRICHE – Relatore: Bortolini L.

Tesi di laurea: Senette R. (Politecnico di Torino, anno accademico 2018- 2019) – Modello di simulazione SWMM per le tecniche di drenaggio urbano sostenibile in zona Borgo Dora (Torino) – Relatore: Boano F.

Woods Ballard B., Wilson S., Udale-Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. (2015), The SuDS Manual, CIRIA