



# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

## Tesi di Laurea Magistrale

Modello di simulazione SWMM per le tecniche di  
drenaggio urbano sostenibile in zona Borgo Dora (Torino)

Relatori:  
Prof. Fulvio Boano

Candidata:  
Rosalba Senette

Aprile 2019



*“Grazie soprattutto ai miei genitori,  
questo traguardo è anche vostro.”*



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>Sistemi di drenaggio urbano</b>	<b>3</b>
1.1 Gli effetti dell'urbanizzazione sulle reti di drenaggio.....	4
1.1.1 Impermeabilizzazione del suolo .....	5
1.1.2 Variazione della portata di base.....	5
1.1.3 Inquinamento delle acque .....	7
<b>Low-Impact Development (LID)</b>	<b>9</b>
2.1 I principi delle LID .....	10
2.1.1 Quantità d'acqua .....	10
2.1.2 Qualità dell'acqua .....	12
2.1.3 Amenità.....	12
2.1.4 Biodiversità .....	13
2.2 Aree di bioretensione .....	14
2.3 Tetti verdi (green roofs).....	17
2.4 Pavimentazioni permeabili (pervious pavements).....	20
2.5 Sistemi di trincee (swale systems) .....	22
2.6 Modelli di simulazione per le LID.....	24
2.6.1 Long-Term Hydrologic Impact Assessment–Low Impact Development....	25
2.6.2 Storm Water Management Model (SWMM).....	25
2.6.3 System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtegration.....	25
<b>Software di calcolo SWMM (Storm Water Management Model)</b>	<b>27</b>
3.1 Informazioni generali su SWMM .....	27
3.2 Modello concettuale.....	28
3.3 Rappresentazione del sistema di drenaggio .....	29
3.3.1 Modulo idrologico (Hydrology) .....	30
3.3.2 Modulo idraulico (Hydraulics) .....	30
3.3.3 Modulo qualità (Quality) .....	32
3.4 Opzioni di Simulazione (Simulation Options).....	33
3.4.1 Deflusso superficiale.....	33
3.4.2 Infiltrazione.....	36
3.4.3 Modello di calcolo: Onda Dinamica .....	37
3.5 Rappresentazione delle LID.....	38
3.6 Equazioni governanti il funzionamento delle LID.....	41
3.6.1 Aree di bioretensione .....	41

3.6.2	Tetti verdi.....	43
3.6.3	Pavimentazioni permeabili.....	43
3.7	LID Editor.....	44
3.7.1	LID Control Editor.....	44
3.7.2	LID Group Editor.....	48
3.7.3	LID Usage Editor.....	48
<b>Caso studio zona Borgo Dora</b>		<b>51</b>
4.1	Inquadramento .....	51
4.2	Modellazione idraulica della rete.....	53
4.2.1	Aree drenate .....	53
4.2.2	Collettori .....	54
4.3	Considerazioni idrologiche .....	56
4.4	Stato attuale della rete.....	58
<b>Sopralluogo e inserimento delle LID</b>		<b>63</b>
5.1	Sopralluogo e considerazioni Via Andreis interno 18 .....	64
5.2	Sopralluogo e considerazioni Via Borgo Dora .....	65
5.3	Sopralluogo e considerazioni Lungo Dora .....	68
5.4	Inserimento delle LID in SWMM.....	68
<b>Risultati e commenti – Modello con LID</b>		<b>71</b>
6.1	Simulazione per TR = 2 anni .....	71
6.2	Simulazione ipotizzando una maggiore presenza di LID per TR = 2 anni.....	73
6.3	Commenti.....	75
<b>Risultati e commenti – Modello con LID e apertura nuovi scarichi</b>		<b>77</b>
7.1	Simulazione con apertura scarichi TR=2 anni .....	78
7.2	Simulazione con LID e apertura scarichi TR=2 anni.....	81
7.3	Simulazione con apertura scarichi TR=5 anni .....	83
7.4	Simulazione con LID e apertura scarichi TR=5 anni.....	85
7.5	Commenti.....	88
<b>Conclusioni</b>		<b>89</b>
<b>Appendice A</b>		<b>93</b>
	Confronto fra gli “Status Report” del modello finale e iniziale.....	93
<b>Appendice B</b>		<b>97</b>
	Caratteristiche principali dei sottobacini dedicati alle LID .....	97
<b>Bibliografia e Sitografia</b>		<b>99</b>

# Introduzione

I sistemi di drenaggio urbano per le acque meteoriche sono l'insieme delle opere idrauliche capaci di raccogliere, convogliare e allontanare dalle zone urbanizzate le acque bianche, per poi reinserirle nell'ambiente dopo gli eventuali trattamenti di depurazione. Questi sistemi sono costituiti da collettori, che devono essere opportunamente dimensionati, in modo da evitare che vadano in pressione e causino allagamenti sul piano stradale.

Le dimensioni dei collettori vengono dettate dalla portata che circola al loro interno, che a sua volta viene definita dalla quantità di precipitazione e dalle caratteristiche delle superfici scolanti. La proprietà principale, che influenza i deflussi prodotti dalle aree che vengono drenate dalla rete, è l'impermeabilità. A causa del fenomeno dell'urbanizzazione, essa può variare nel tempo. Quindi, l'urbanizzazione altera non solo l'ambiente, ma anche i processi idrologici.

La presenza di elementi come strade, parcheggi, tetti e marciapiedi comporta inevitabilmente l'impermeabilizzazione del suolo e di conseguenza un aumento del deflusso superficiale e un abbassamento dell'infiltrazione e dell'evapotraspirazione. L'insieme di tutti questi processi provoca delle problematiche all'interno della rete fognaria, poiché la quantità d'acqua, che finirà al suo interno, sarà maggiore rispetto a quella per la quale è stata dimensionata.

Delle pratiche alternative per ovviare a questi inconvenienti sono i sistemi di drenaggio urbano sostenibile, noti anche come Best Management Practices (BMP), Low Impact Development (LID) o Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). Il loro compito è quello di controllare le acque bianche tramite tecnologie a basso impatto, che sfruttano le risorse naturali e mirano al mantenimento del regime idrico presente prima dell'urbanizzazione.

Esistono diversi sistemi per gestire le acque superficiali, i più sfruttati sono: le aree di bioretensione, i tetti verdi e le pavimentazioni permeabili.

Tali pratiche vengono progettate per cercare di preservare i naturali cicli idrici, mantenere la portata di base del bacino e ripristinare la ricarica delle acque di falda. Le LID non si occupano solo dei problemi legati alla quantità dell'acqua, esse trattengono determinate sostanze inquinanti, preservando la qualità delle acque sotterranee e superficiali. Inoltre, supportano l'ecosistema esistente e grazie al loro aspetto estetico, valorizzano l'ambiente in cui si trovano, creando degli spazi più vivibili e piacevoli.

Per tutte queste ragioni, è risultato opportuno sperimentare l'introduzione delle LID all'interno di un sistema di drenaggio urbano esistente a Torino e caratterizzato da forti problematiche. La rete in questione si trova nel quartiere Borgo Dora e drena una superficie totale di circa 75 ettari. Lo scopo di questa tesi è stato quello di valutare gli effetti prodotti dall'inserimento di pavimentazioni permeabili, aree di bioretensione e tetti verdi nella zona di interesse, cercando di risolvere lo stato di crisi in cui riversa la rete nello stato attuale.

Per modellare il comportamento della rete e delle pratiche LID, è stato sfruttato il software di calcolo SWMM.

SWMM è un modello fisicamente basato di gestione delle acque meteoriche, capace di simulare il fenomeno dinamico afflussi-deflussi. Il programma opera trasformando le precipitazioni che si riversano su un insieme di aree, chiamate subcatchments, in deflusso.

Quindi l'area totale di zona Borgo Dora è stata divisa in sottobacini e sono state svolte delle simulazioni a differenti tempi di ritorno (2 e 5 anni) per valutare l'effetto benefico delle LID inserite.

La presente tesi è strutturata nei seguenti sette capitoli:

**Capitolo 1:** descrive brevemente i sistemi di drenaggio urbano, specificando gli effetti negativi che l'urbanizzazione provoca su di essi, come: l'impermeabilizzazione del suolo, la variazione della portata di base e l'inquinamento delle acque.

**Capitolo 2:** presenta le Best Management Practices come possibile soluzione ai problemi legati alla variazione del ciclo idrogeologico, operata dal fenomeno dell'urbanizzazione. Nel dettaglio, vengono esposte le caratteristiche principali delle pratiche più utilizzate come: le pavimentazioni permeabili, le aree di bioretensione, i tetti verdi e le trincee drenanti. Inoltre, sono brevemente esposti i modelli di simulazione più comunemente usati per rappresentarle.

**Capitolo 3:** spiega il principio e le equazioni che regolano il funzionamento del software di calcolo SWMM, scelto per le analisi operate nella presente tesi, sia per quanto riguarda un sistema di drenaggio convenzionale, sia per le pratiche LID.

**Capitolo 4:** contiene l'inquadramento di Zona Borgo Dora, la modellazione idraulica della rete (con le ipotesi fatte sui sottobacini e i collettori), le considerazioni sugli eventi idrologici utilizzati nelle simulazioni e lo stato attuale della rete per tempi di ritorno pari a 2 anni.

**Capitolo 5:** chiarisce le scelte fatte per il posizionamento dei sistemi LID in zona Borgo Dora, tramite la descrizione del sopralluogo svolto e illustra l'inserimento delle LID nel modello SWMM.

**Capitolo 6:** Vengono commentati e presentati i risultati delle simulazioni del modello in presenza di sistemi di drenaggio sostenibile per tempi di ritorno pari a 2 anni.

**Capitolo 7:** Propone una modifica nei collettori (apertura di due nuovi scarichi) e viene svolto un confronto fra i risultati nel caso senza LID e con LID per tempi di ritorno di 2 e 5 anni.

# Capitolo 1

## Sistemi di drenaggio urbano

La denominazione sistema di drenaggio urbano [1] è utilizzata per definire il complesso di opere idrauliche atte a raccogliere, convogliare e allontanare dalle zone urbanizzate le acque reflue e meteoriche, per poi reimmetterle nell'ambiente dopo gli opportuni trattamenti di depurazione.

Fino agli anni '70 le acque all'interno della rete fognaria venivano unicamente trasportate e scaricate senza subire alcun trattamento, in seguito tale concezione di fognatura è stata sostituita dal più moderno concetto di sistema di drenaggio.

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

Una rete fognaria può essere a sistema unitario o misto quando raccoglie nella stessa canalizzazione sia le acque reflue che quelle di pioggia (metodo oggi raramente utilizzato), e a sistema separato se le acque reflue vengono raccolte in un'apposita rete distinta da quella che raccoglie le acque superficiali.

Gli impianti di fognatura sono suddivisi nelle seguenti sezioni:

- rete di raccolta, le opere che intercettano e convogliano le acque delle aree servite (caditoie stradali, pozzetti e manufatti di scarico);
- impianti di trasporto, le opere che trasportano l'acqua agli impianti di depurazione e al recapito finale, o al loro riuso (collettori e pozzetti);
- impianti di depurazione, insieme delle opere per il trattamento delle acque e per conferire loro caratteristiche compatibili con quelle del ricettore.

I collettori del sistema di drenaggio urbano sono percorsi da correnti a superficie libera che richiedono una differenza di quota per garantire il deflusso dell'acqua. L'andamento altimetrico del terreno diventa quindi molto importante per garantire le adeguate pendenze. I principi generali che regolano il funzionamento della rete fognaria sono associati alla velocità dell'acqua nei collettori, la quale dovrà risultare compresa tra valori tali da evitare la sedimentazione delle sostanze trasportate e allo stesso tempo tali da evitare l'usura per abrasione dei collettori. Per garantire questi limiti di velocità è possibile intervenire modificando parametri come pendenza, scabrezza e dimensione dei diametri dei collettori.

“Ai fini del drenaggio delle acque meteoriche le reti di fognatura bianca o mista debbono essere gestite in modo tale da garantire che fenomeni di rigurgito non interessino il piano

stradale e le immissioni di scarichi neri con frequenza superiore ad una volta ogni cinque anni per ogni singola rete” [2]. Per questo motivo i diametri dei collettori devono essere dimensionati affinché la portata massima da smaltire possa transitare al suo interno senza mai riempire completamente il perimetro a disposizione, evitando che il sistema entri in pressione.

I collettori non sono in grado di sopportare pressioni elevate ed un funzionamento in tali condizioni potrebbe danneggiarli, oltre ad accrescere il rischio di allagamenti soprattutto per la rete adibita al trasporto delle acque bianche.

Il piano stradale risulta collegato mediante pozzetti ai collettori sottostanti ed in presenza di portate eccessivamente elevate, la piezometrica tenderà gradualmente a distaccarsi dall’andamento della condotta fino ad oltrepassare il piano campagna con conseguente risalita dell’acqua all’interno dei pozzetti ed allagamento delle aree superficiali.

Per evitare che ci siano allagamenti a livello del piano stradale e che il sistema di drenaggio entri in crisi è opportuno conoscere le portate che affluiscono alla rete stessa dalle superfici scolanti dei centri abitati e dei territori urbanizzati.

La determinazione delle portate raccolte dal sistema avviene a partire dalla conoscenza delle precipitazioni, ponendo però in conto l’estensione, la natura e la composizione delle superfici scolanti per stabilire quale frazione (pioggia efficace) concorra alla loro formazione [1].

Il mutamento delle caratteristiche delle superfici scolanti nel tempo, dovuto al fenomeno dell’urbanizzazione, causa delle problematiche all’interno della rete fognaria, legate sia alla quantità che alla qualità dell’acqua.

## **1.1 Gli effetti dell’urbanizzazione sulle reti di drenaggio**

Il numero di persone che risiede nelle aree urbane cresce di anno in anno e si prevede che entro il 2050 tale popolazione rappresenterà il 66% di quella globale [3].

I continui cambiamenti demografici e climatici si riflettono nella pianificazione urbana che si concentra sullo sviluppo geospaziale di una città [4].

La maggioranza delle decisioni in merito al benessere del pianeta viene presa dalla popolazione che vive nelle città, la quale è distante sia fisicamente che mentalmente dall’ambiente naturale. La crescita urbana solitamente è a spese dei sistemi terrestri e marini che piano piano perdono la piena capacità di sostenere le richieste essenziali dell’ecosistema [5].

Il fenomeno dell’urbanizzazione altera non solo l’ambiente ma anche i processi idrologici. Attraverso il naturale ciclo dell’acqua si ha un equilibrio tra evapotraspirazione, precipitazione, infiltrazione, ricarica delle acque sotterranee, assorbimento e traspirazione

delle piante; infatti la vegetazione intercetta, rallenta e restituisce acqua all'atmosfera, diminuendo il quantitativo d'acqua che si infiltra nel terreno [6].

### **1.1.1 Impermeabilizzazione del suolo**

L'inserimento di elementi come strade, parcheggi, tetti e marciapiedi comporta inevitabilmente l'impermeabilizzazione del suolo e di conseguenza un aumento del deflusso superficiale e un abbassamento dell'infiltrazione, dell'evapotraspirazione e dell'alimentazione delle falde [7].

Se un suolo permeabile viene sostituito con uno impermeabile si ha una variazione sia temporale che spaziale nello spostamento dei volumi di pioggia, poiché l'acqua in superficie ruscella più velocemente. Pertanto, le acque meteoriche nelle superfici impermeabili si infiltrano in altri punti e con tempi di propagazione diversi. Inoltre, la riduzione di aree adeguatamente drenanti intensifica i volumi di piena e determina un incremento della portata al colmo e una riduzione del suo tempo caratteristico di formazione.

La bassa capacità delle aree urbanizzate di assimilare le acque di precipitazione comporta notevoli aumenti nel volume, velocità e portata del deflusso superficiale aggravando i problemi legati agli allagamenti.

Le piogge intense, in concomitanza con le problematiche legate all'impermeabilità del suolo dovuto all'urbanizzazione, generano importanti problemi nel sistema di drenaggio, poiché il quantitativo d'acqua che la rete è in grado di smaltire risulta essere minore rispetto a quello che arriva in fognatura. Ai problemi sopracitati vanno aggiunte le complicazioni dovute alla mancanza di manutenzione periodica delle fognature che peggiorano maggiormente la situazione. La figura 1.1 riassume gli impatti dell'urbanizzazione su un bacino idrografico.

### **1.1.2 Variazione della portata di base**

In seguito al cambiamento del naturale ciclo idrologico a causa dell'inurbamento si hanno importanti variazioni anche nella portata di base di un corso d'acqua all'interno di un bacino idrografico [8]. La portata di base è la porzione di portata proveniente dalle acque sotterranee, quindi è il risultato netto dei meccanismi che si verificano nel sottosuolo.

Gli elementi che influenzano il regime di tale flusso sono: l'impermeabilità del bacino, la connessione tra zone impermeabili e corpo idrico ricettore, la distribuzione spaziale delle superfici impermeabili, l'estrazione e il drenaggio di acque sotterranee.

Risulta molto complicato generalizzare le alterazioni della portata di base provocate dalle trasformazioni del territorio. Numerosi studi hanno dimostrato un abbassamento a causa di una riduzione dell'infiltrazione, altri un aumento dovuto all'acqua in ingresso esterna o a pratiche di gestione delle acque piovane.

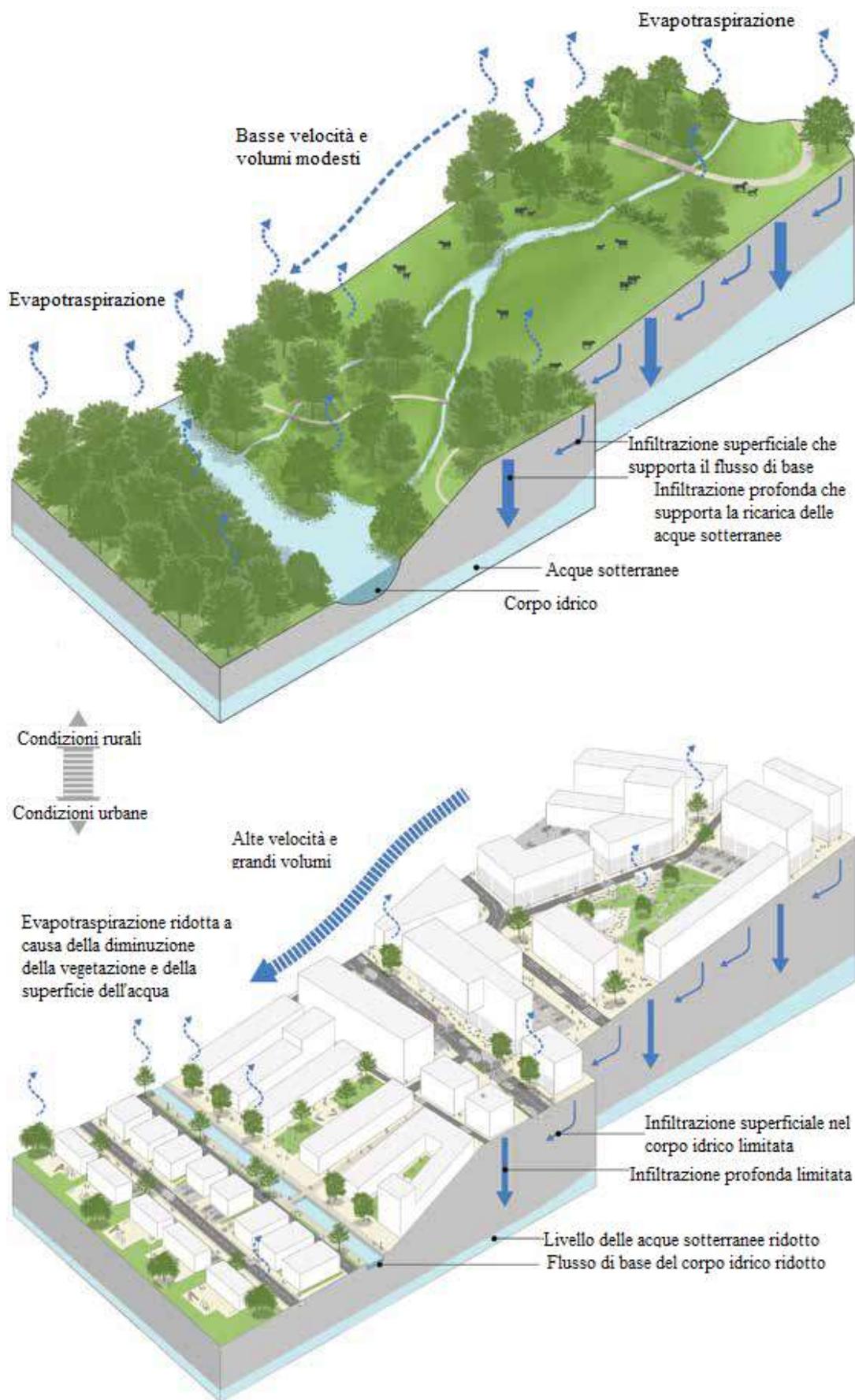


Figura 1. 1 : Effetti dell'urbanizzazione su un bacino [6]

### 1.1.3 Inquinamento delle acque

Lo sviluppo urbano determina problematiche relative non solo alla quantità delle acque da gestire ma anche alla qualità.

Le acque meteoriche dilavano le sostanze inquinanti accumulate sulla pavimentazione stradale e le convogliano all'interno dei collettori. Senza un adeguato trattamento di depurazione, queste sostanze confluiscono nei fiumi, nelle acque sotterranee e nei mari rappresentando un rischio per l'ambiente e la salute pubblica [6].

L'inquinamento dipende dall'estensione e dal tipo di urbanizzazione (residenziale o industriale) e solitamente in tali acque si registra una crescita di concentrazione di sostanze chimiche come metalli, ammonio, idrocarburi, fosforo e solidi sospesi [9].

I metalli più comuni trovati nelle acque provenienti dal dilavamento della superficie stradale comprendono piombo, zinco, cromo, rame, manganese, nichel e cadmio, proprio perché questi elementi costituiscono i rivestimenti dei freni, gli pneumatici e parti del motore dei veicoli.

Gli ioni cloruro sono molto elevati nei flussi urbani, specialmente dove il cloruro di sodio è ancora usato come principale prodotto antigelo nelle strade.

I pesticidi (come insetticidi, erbicidi e fungicidi) sono altre sostanze dannose rilevate nelle acque provenienti dalle città e spesso la loro quantità supera i limiti imposti per la protezione del biota. La cosa più sorprendente è che la concentrazione di molti pesticidi nei sedimenti urbani supera frequentemente quella osservata nelle aree agricole [10].

Un ulteriore fonte di inquinamento sono i contaminanti organici come i bifenili policlorurati, gli idrocarburi policiclici aromatici, e gli idrocarburi alifatici a base di petrolio.

A causa degli impatti negativi visti sopra, è necessario riconnettere gli abitanti delle aree urbane alla biosfera, in modo che la popolazione possa supportare i sistemi dalla quale dipende. Un approccio urbano socio-ecologico riduce i problemi esistenti tra la conservazione e l'espansione delle città e fornisce indicazioni per spostare i modelli dell'urbanizzazione verso la sostenibilità [5].

Inoltre, le importanti limitazioni idrauliche delle reti fognarie esistenti hanno richiesto nuovi scenari di pianificazione atti a una pesante riduzione delle portate di piena convogliate verso valle. Una soluzione che va in tale direzione è data dall'uso di pratiche come le LID (Low-Impact Development).



## Capitolo 2

### Low-Impact Development (LID)

Le Low-Impact Development rappresentano l'insieme di strategie e tecniche che vengono utilizzate nella gestione sostenibile delle acque meteoriche.

Il loro scopo è quello di controllare le acque bianche tramite tecnologie a basso impatto che imitano i processi naturali e mirano al mantenimento del regime idrico presente prima dell'urbanizzazione [7].

Le LID sono conosciute nel mondo con diverse terminologie [11]:

- Green Infrastructure (GI)
- Best Management Practice (BMP)
- Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS, nel Regno Unito)
- Water Sensitive Urban Design (WSUD, in Australia)
- Integrated Urban Water Management (IUWM)

La filosofia delle LID è di massimizzare i benefici e minimizzare gli impatti negativi provocati dal deflusso delle acque superficiali nelle aree sviluppate.

Le infrastrutture verdi hanno la funzione di rallentare e ridurre il deflusso superficiale nelle aree urbanizzate, in modo da limitare il rischio di alluvione a valle e abbassare il rischio di inquinamento. Tutto questo si raggiunge attraverso l'infiltrazione, la raccolta, il rallentamento, l'immagazzinamento, il convogliamento e il trattamento della portata nel sito e dove è possibile in superficie piuttosto che nel sottosuolo [6].

Al contrario, nell'approccio tradizionale, noto come Conventional Development, si cerca di ridurre il picco di portata massima del deflusso tramite la rimozione d'acqua da un sito per evitare l'allagamento, disinteressandosi ai problemi legati alla qualità delle acque. Quindi nell'approccio tradizionale si cerca di convogliare l'acqua al corpo idrico ricettore il più rapidamente possibile per mezzo dei sistemi fognari, mentre nelle LID si vuole mantenere l'acqua in loco il più possibile per migliorarne le caratteristiche [7].

Di seguito vengono riassunti gli innumerevoli benefici delle LID [6]:

- proteggere le persone e le proprietà dall'aumento del rischio di alluvione dovuto allo sviluppo;
- proteggere la qualità delle acque sotterranee e superficiali dal deflusso inquinato;
- proteggere il naturale regime di flusso dei fiumi, laghi e ruscelli;

- Supportare l'ecosistema esistente;
- Migliorare l'umidità del suolo e reintegrare i livelli delle acque sotterranee impoverite;
- Fornire alla società un'offerta preziosa d'acqua;
- creare posti piacevoli dove le persone vogliono lavorare, vivere e passare il tempo libero;
- arricchire la conoscenza delle persone in merito ai problemi legati allo sviluppo;
- offrire un rapporto costi-benefici vantaggioso nelle infrastrutture che usano i sistemi LID.

Esistono diverse tecniche per gestire le acque superficiali, le più sfruttate e quelle utilizzate nel caso studio sono: le aree di bioretensione, i tetti verdi (green roofs), le pavimentazioni permeabili (permeable pavement) e i sistemi di trincee (swale systems).

## 2.1 I principi delle LID

I principi su cui si basano le LID sono quattro [6]:

- Water Quantity (Quantità d'acqua): controllare la quantità d'acqua attraverso la gestione del rischio di allagamento e la protezione del naturale ciclo dell'acqua.
- Water Quality (Qualità dell'acqua): gestire la qualità del deflusso per prevenire l'inquinamento.
- Amenity (Amenità): creare e promuovere posti migliori per le persone.
- Biodiversity (Biodiversità): creare e promuovere posti migliori per la natura.

### 2.1.1 Quantità d'acqua

Le LID vengono progettate per cercare di preservare i naturali cicli idrici e i normali livelli di umidità del suolo, mantenere la portata di base del bacino e ripristinare la ricarica delle acque di falda. Tali pratiche, limitando la potenza dei flussi in entrata, sono in grado di favorire la riduzione del rischio di erosione dei letti e delle sponde dei corpi idrici ricettori. Per far sì che lo sviluppo urbano non abbia impatti negativi sulle persone e sull'ambiente è importante un attento controllo della velocità e del volume del deflusso superficiale, ma soprattutto è rilevante vedere come quest'ultimo si distribuisce nel tempo.

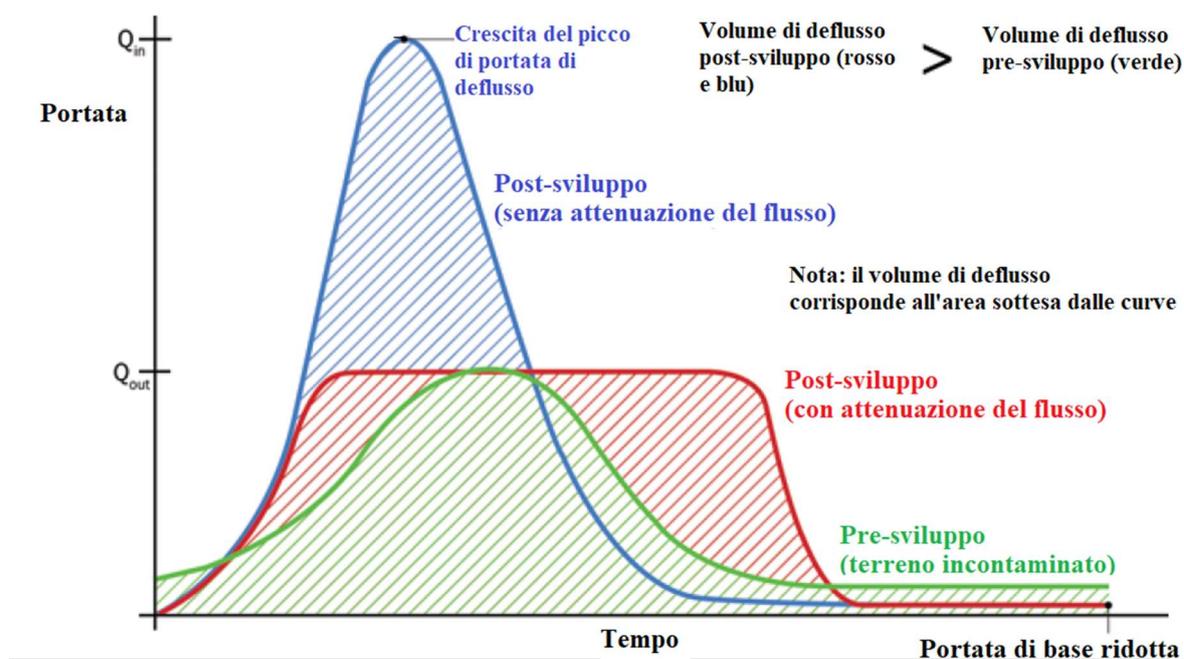
Un sito urbanizzato possiede dei tassi di picco di deflusso maggiori rispetto a una zona incontaminata, perché l'area impermeabile, senza opportuni accorgimenti, drena l'acqua molto più velocemente.

La figura 2.1. evidenzia l'aumento di portata che si ha in una zona antropizzata (curva blu) rispetto a un'area non ancora modificata dall'uomo (curva verde). Nella prima il picco di deflusso è maggiore e arriva in tempi più brevi rispetto a quello della seconda.

Lo scopo delle LID è di attenuare il picco di portata distribuendolo in un lasso di tempo più lungo. Per ottenere ciò è necessario rallentare e immagazzinare il deflusso sul sito e in seguito rilasciarlo a una velocità più bassa.

L'operazione di attenuazione (curva rossa) controlla la velocità massima di deflusso estendendo l'idrogramma. Quindi, tramite la fase di attenuazione del flusso, si abbassa il picco di portata, ma poiché si ha un volume di deflusso aggiuntivo rispetto alla situazione originaria inalterata, il tempo durante il quale si verifica tale evento sarà significativamente più lungo.

Il controllo del picco massimo di portata è estremamente significativo, ma non è sufficiente per ridurre l'impatto negativo dell'espansione urbana sul bacino più a valle, è necessario sorvegliare anche la qualità dell'acqua.



**Figura 2. 1:**Esempio della variazione di deflusso in un'area soggetta all'urbanizzazione [6]

### **2.1.2 Qualità dell'acqua**

I collettori del sistema di drenaggio sono dimensionati per convogliare l'acqua a una velocità che permette di mantenere i sedimenti in sospensione, in modo da impedire l'accumulo di sostanze all'interno del tubo. Di conseguenza gli inquinanti vanno a riversarsi direttamente sul corpo idrico ricevente.

Il grado di contaminazione di un'area cresce con l'aumentare dell'intensità del traffico, concentrandosi maggiormente in prossimità di attività commerciali e industriali.

Le LID, oltre che a prevenire il rischio di allagamenti, possono trattare e depurare le acque provenienti da deflussi superficiali urbani.

Per controllare la contaminazione delle acque vi sono diverse fasi da seguire: prevenzione dell'inquinamento, intercettazione, trattamento e manutenzione del sistema.

Per prima cosa è molto importante prevenire l'inquinamento, ovvero impedire alle sostanze dannose di combinarsi con il deflusso. Questo ad esempio si può ottenere lavando le strade asfaltate periodicamente e trattando le acque di lavaggio, in modo che non ci sia un accumulo eccessivo di sostanze inquinanti.

Le portate vengono sia intercettate che trattate dalle LID attraverso l'uso di superfici permeabili, sistemi di raccolta vegetati e stratificazioni di suolo. In questo modo il livello di contaminanti del deflusso viene portato a livelli accettabili.

Per allontanare gli inquinanti trattenuti e non influenzare le prestazioni del sistema è imprescindibile una regolare manutenzione.

Vengono adottati diversi accorgimenti per consentire ai processi di trattamento dei deflussi di essere efficaci. Una soluzione molto vantaggiosa è quella di gestire il deflusso dell'acqua superficiale vicino all'origine, perché in questo modo i livelli di inquinanti da trattare sono più bassi e il trattamento fornito può essere proporzionale al livello di contaminazione. Inoltre, qualora si verificassero sversamenti accidentali, il problema può essere isolato più facilmente senza condizionare la rete più a valle.

È consigliabile trattare il deflusso inquinato sulla superficie perché: possono verificarsi i processi di fotolisi e volatilizzazione dato che i sedimenti sono esposti alla luce UV; se il sedimento viene intrappolato nella parte superiore, può essere facilmente eliminato senza eccessivi lavori di manutenzione.

### **2.1.3 Amenità**

Il compito delle LID non si riduce solo al controllo quantitativo e qualitativo degli scompensi creati dall'aumento del deflusso superficiale, ma è anche associato alla creazione e alla promozione di posti più "vivibili" per le persone. Con quest'ultimo termine si intende ambienti piacevoli, attraenti ma soprattutto utili che valorizzano la comunità locale.

Le acque meteoriche sono un'importante risorsa e gestirle in superficie, piuttosto che nel sottosuolo, porta a numerosi vantaggi: accresce il valore estetico, ricreativo e quindi economico della zona, favorisce la salute e il benessere, contribuisce a ridurre le temperature estive, fornisce una risorsa per l'educazione ambientale e offre un habitat valido per la flora e la fauna.

In numerosi studi [6] è stato dimostrato come un ampio paesaggio "verde" migliori la salute psicologia e fisica delle persone. Ad esempio, i residenti in zone prossime a parchi hanno più probabilità di fare la raccomandata attività fisica quotidiana. Gli uffici che hanno una vista su un paesaggio gradevole, rendono l'attività occupazionale meno onerosa e aumentano le soddisfazioni lavorative degli impiegati. In una ricerca [6], fatta su pazienti di ospedali con camera vista su spazi verdi e pazienti con camere vista strada, è stato provato che i primi hanno fatto meno richieste di farmaci antidolorifici e hanno avuto un recupero dopo l'intervento migliore.

#### **2.1.4 Biodiversità**

In tutta Europa viene riconosciuta l'esigenza di sostenere la biodiversità, proteggendo le specie minacciate dal continuo mutamento del loro habitat.

Le LID fanno parte di una progettazione più ampia, che riguarda il ripristino e la realizzazione di collegamenti fra gli ambienti naturali. Infatti, tali pratiche devono essere considerate insieme a degli spazi verdi più ampi per dare dei risultati migliori.

Per limitare la frammentazione degli ecosistemi all'interno delle aree urbane, le LID fungono da veri e propri collegamenti tra habitat all'interno della città ed habitat più in periferia. Inoltre, le LID forniscono riparo e ristoro per diverse specie selvatiche tra cui anfibi, invertebrati, uccelli, pipistrelli e altri mammiferi.

L'infrastruttura verde offre un ambiente stabile per la fauna, dei percorsi per la migrazione di animali e un passaggio sicuro per il deflusso delle acque superficiali che superano la capacità del sistema di drenaggio.

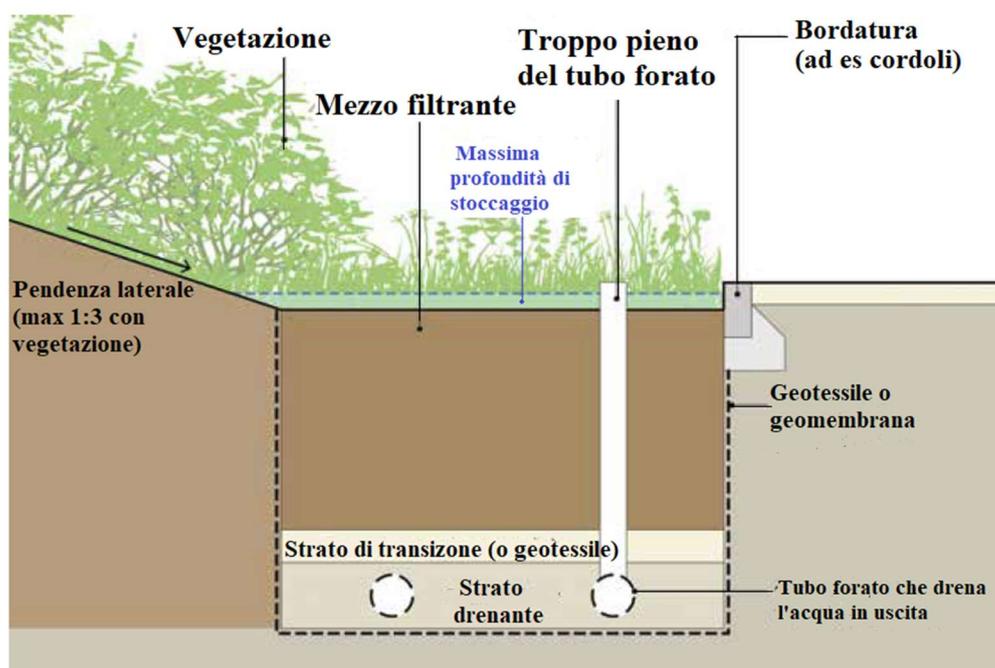
## 2.2 Aree di bioretensione

I sistemi di bioretensione (compresi i giardini pluviali) [6] simulando l'ecosistema di un bosco, abbassano la quantità di deflusso superficiale e il tasso di inquinanti all'interno delle acque di precipitazione, servendosi della vegetazione e di strati di suolo drenante.

Il loro compito non è solo quello di intercettare le portate che transitano sul piano stradale, ma favoriscono l'inserimento di soluzioni paesaggistiche interessanti (ad esempio sistemi auto-irriganti), forniscono un habitat per determinate specie animali e vegetali, preservando la biodiversità, e attenuano le temperature del microclima agevolando l'evapotraspirazione. L'acqua piovana viene raccolta temporaneamente in superficie e poi filtrata per mezzo della vegetazione nel suolo sottostante.

Il deflusso filtrato può andare direttamente nel sistema di drenaggio, oppure, se il sito lo permette, può essere rilasciato nel terreno circostante. Il vantaggio di tali pratiche è che una parte del deflusso iniziale verrà perso tramite l'evapotraspirazione e la traspirazione della vegetazione.

Gli elementi principali delle aree di bioretensione vengono illustrati in figura 2.2.



**Figura 2. 2** : Componenti di un sistema di bioretensione [6].

Le principali funzioni dei componenti sono le seguenti:

- Il **sistema di ingresso** deve essere progettato in modo da distribuire uniformemente l'acqua nella superficie filtrante senza causare erosioni.

- La **profondità di stoccaggio** in superficie solitamente si aggira intorno ai 150-300 mm e serve per intercettare e attenuare la portata da trattare.
- La **vegetazione** svolge numerose funzioni: trattiene direttamente le sostanze inquinanti, favorisce le reazioni chimiche all'interno del suolo, limita le erosioni sullo strato superficiale, dovute alla violenza del flusso in entrata, e aiuta il mezzo filtrante a non intasarsi.
- Il **mezzo filtrante** è solitamente costituito da una base in sabbia con una determinata quantità di materiale organico, che rilascia le sostanze nutrienti per il sostentamento delle piante. Il suo compito è quello di bloccare gli inquinanti e controllare che la velocità di filtrazione permetta al sistema di essere efficace. Lo spessore raccomandato è di 750-1000 mm, anche se per sistemi molto piccoli può avere un valore più basso, ma mai minore di 400 mm.
- Lo **strato di transizione** è utile per separare il mezzo filtrante dallo strato di drenaggio, cosicché il materiale fine appartenente al primo non vada a finire sul secondo. Deve avere uno spessore di almeno 100 mm e può essere costituito da materiale geotessile.
- Lo **strato drenante** convoglia l'acqua proveniente dal materiale filtrante soprastante e permette facilmente il suo arrivo ai tubi forati. Tale strato deve adeguatamente ricoprire il tubo forato per circa 100 mm e deve essere abbastanza fine, in modo da permettere al flusso di arrivare velocemente al tubo forato.  
La profondità rispetto al piano campagna dello strato drenante è funzione del diametro, della pendenza, della copertura minima del tubo e della lunghezza del sistema drenante.  
Lo strato drenante e il tubo forato possono essere sostituiti da unità geocellulari, quando vi è la necessità di avere un maggiore volume di stoccaggio.
- I **tubi forati** incanalano l'acqua e la convogliano a valle.
- Il **troppo pieno** è fondamentale per far uscire l'acqua in eccesso dal sistema.

Esistono diverse varianti dei sistemi di bioretensione, i più semplici sono i cosiddetti giardini di pioggia o rain gardens, utilizzati di solito in una singola proprietà o in strade private.

Nei giardini di pioggia, il complesso sistema delle bioretensioni visto sopra si riduce a un unico strato di 200-500 mm, costituito da una miscela specifica di suolo che permette l'infiltrazione. I giardini di pioggia possono avere un tubo che convoglia la portata in uscita in un'area circostante e lo spessore d'acqua stagnante in superficie è massimo di 150 mm.

I sistemi di bioretensione, per la loro versatilità in termini dimensionali e di aspetto, possono essere inseriti in diversi contesti, migliorando l'estetica del paesaggio circostante come in figura 2.3.



**Figura 2.3** : a) Area di bioretensione [6]. b) rain gardens [12]

Diventa interessante mostrare alcuni dati numerici riguardanti gli effetti prodotti dall'introduzione dei sistemi di bioretensione. Tali risultati sono ricavati da diversi studi [7].

L'abbassamento dei volumi di deflusso dipende dall'entità della precipitazione, nel caso di piccoli eventi, i sistemi di bioretensione riescono a trattenere tutto il volume prodotto. Il picco di portata viene ridotto da un minimo del 40% a un massimo del 97%.

Le aree di bioretensione favoriscono l'azione dell'infiltrazione e dell'evapotraspirazione, infatti, il 48-74% del volume perso è dovuto a questi fenomeni. Il 20-50%, invece, proviene dall'esfiltrazione e dall'evapotraspirazione.

Inoltre, è stato dimostrato che tra tutte le LID le aree di bioretensione sono le migliori nella riduzione di inquinanti. Le sostanze solide sospese (TSS) vengono rimosse fino al 99%, l'azoto totale (TN) del 55% circa, il fosforo (P) intorno all'80%, i metalli come il rame (Cu), il piombo (Pb) e lo zinco (Zn) da un minimo del 30% a un massimo del 99%. I sistemi di bioretensione sono molto importanti anche nella riduzione della percentuale di batteri all'interno dei volumi di deflusso, infatti si è verificata un abbassamento del 70-90%.

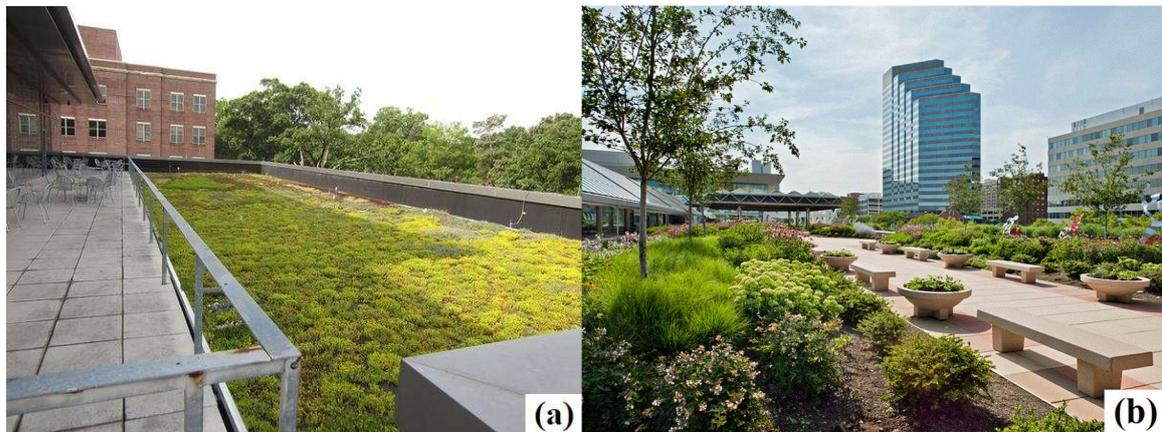
La composizione del materiale che costituisce queste strutture è fondamentale nel determinare la capacità di trattenere le sostanze inquinanti. In un importante studio di Hsieh e Davis [13] è stato verificato che il materiale che ha le migliori caratteristiche nel bloccare i contaminanti è la sabbia, ma allo stesso tempo la sua efficienza decresce con l'aumentare del tempo.

## 2.3 Tetti verdi (green roofs)

I tetti verdi ([6], [7]) sono appunto delle aree verdi, che vengono installate sulla sommità degli edifici, per compensare la vegetazione che è stata rimossa in seguito alla costruzione della struttura. La loro realizzazione apporta numerosi benefici: migliora l'estetica e le prestazioni dell'edificio, abbassa il deflusso delle acque superficiali, aumenta la qualità dell'aria e dell'acqua. I tetti verdi vengono classificati in "estensivi" e "intensivi".

I primi (figura 2.4.a) sono costituiti da densa vegetazione a bassa crescita (come muschi, erbe spontanee, piante succulente e graminacee), che non richiede manutenzione e ricopre l'intera superficie del tetto. Per tale motivo, vengono scelte delle piante che si adattano facilmente alle più avverse condizioni climatiche. Il substrato non ha uno spessore eccessivo, quindi ne consegue un basso carico sulla struttura. Proprio perché viene scelta una vegetazione che non necessita di eccessive cure, solitamente non sono accessibili.

I secondi (figura 2.4.b) vengono anche chiamati "giardini pensili", hanno substrati più profondi, perché la copertura vegetale utilizzata comprende anche cespugli e arbusti. Poiché, in questo caso, le piante inserite richiedono una maggior cura, i tetti verdi intensivi sono facilmente accessibili per la manutenzione e talvolta al pubblico.



**Figura 2.4** : a) Tetti verdi estensivi nel Global Education Center dell'università del North Carolina [14]. b) Progetto di un tetto verde intensivo nel Baltimore Convention Center [15].

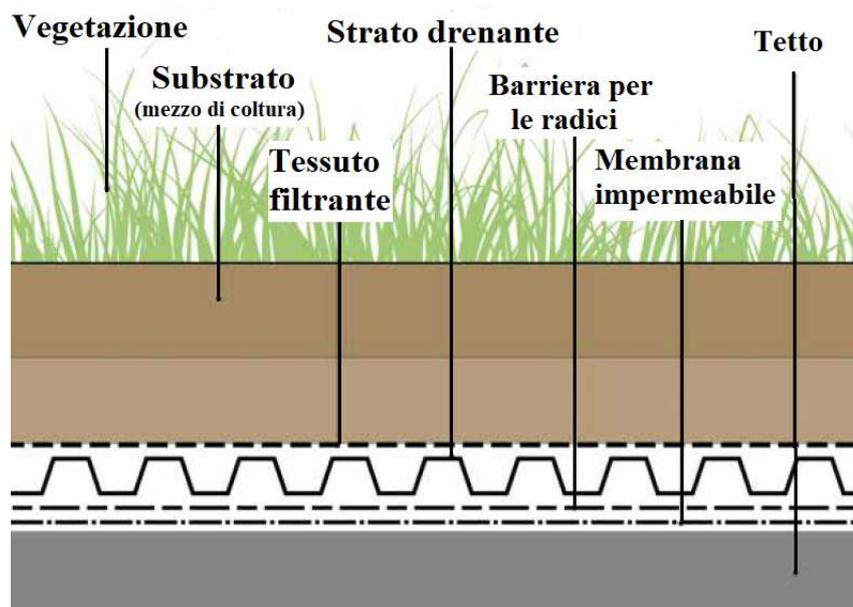
Queste strutture immagazzinano l'acqua, che poi viene rilasciata in modo controllato e utilizzata per l'irrigazione del tetto stesso. Un enorme beneficio, che viene apportato dallo stoccaggio dell'acqua, è l'attenuazione delle temperature del tetto nelle giornate particolarmente afose, grazie all'evapotraspirazione delle piante. Questo abbassa i costi energetici dell'edificio, incrementando le sue prestazioni termiche.

Inoltre, da non sottovalutare la capacità delle piante, presenti nei tetti verdi, di catturare le particelle di polvere, contribuendo a ripulire l'aria della città.

Per la loro progettazione è necessario tenere conto della capacità strutturale del tetto, per poter sopportare i carichi, e dell'impermeabilizzazione, per tutelare l'edificio. Maggiore è il volume d'acqua immagazzinato, maggiore è il carico gravante sull'abitazione.

Il costo per la costruzione e manutenzione dei tetti verdi è più alto rispetto a quello dei tetti tradizionali, ma i primi forniscono molti benefici riscontrabili a lungo termine.

Gli elementi che li compongono variano a seconda del tipo di struttura scelta e del luogo dove vengono inseriti, ma in linea generale i componenti sono illustrati in figura 2.5.



**Figura 2. 5 :** Componenti di un tetto verde [6]

A seconda che si tratti di un tetto verde estensivo o intensivo, cambiano le caratteristiche dei diversi strati:

- Il **substrato** è il terreno di coltura, contenete le sostanze nutritive, che permettono il sostentamento delle piante. Esso ha solitamente uno spessore che va da 20 a 150 mm nel caso dei tetti estensivi, in quelli intensivi è maggiore di 150 mm. Con spessori di 100-200 mm si parla di tetti semi-intensivi, che hanno caratteristiche intermedie tra i due tipi di tetti verdi.
- Lo **strato drenante** può essere separato dal substrato, in questo modo si avrà un sistema “multistrato. Nel caso dei sistemi estensivi si può avere un singolo materiale, che viene progettato sia per essere drenante che per rilasciare le sostanze nutritive delle piante, in questo caso si chiama “sistema monostrato”.
- La **barriera per le radici** è un sistema divisorio che permette la convivenza fra piante e struttura della parte sommitale dell'edificio.

I tetti verdi possono avere qualsiasi dimensione e possono essere installati su diverse tipologie strutturali di copertura. A tal proposito, è necessario fare attenzione alle pendenze, in quanto i tetti più ripidi hanno una capacità di stoccaggio minore, poiché l'acqua scorre più velocemente.

Per ciò che concerne la ritenzione delle precipitazioni nei tetti verdi, bisogna precisare che una parte della precipitazione non può essere trattata e verrà scaricata nel sistema drenante dell'edificio. Una volta che i tetti verdi sono saturi, il loro comportamento idraulico è abbastanza analogo a quello dei tetti tradizionali.

Le loro prestazioni sono differenti a seconda della stagione: in estate, grazie ai processi di evapotraspirazione e al maggior volume di stoccaggio a disposizione, si ha una riduzione maggiore del deflusso; in inverno, invece, si hanno delle difficoltà, poiché è plausibile che il tetto sia quasi sempre saturo. Per questo motivo, è fondamentale fare opportune considerazioni a seconda di quando si verifica l'evento piovoso.

Nei tetti verdi la riduzione di deflusso superficiale varia tra il 20% e il 100%. Questa enorme differenza fra le due percentuali dipende dalla grandezza degli eventi di pioggia, dalla profondità dello strato di terreno e dalla composizione della vegetazione.

Alcune tipologie di tetti verdi possono contribuire ad abbassare la quantità di inquinanti tramite i processi fisici, biologici e chimici, che si verificano all'interno del suolo e della zona di assorbimento dell'acqua. La loro azione filtrante però non è minimamente paragonabile a quella dei sistemi di bioretensione.

In uno studio [16] è stato dimostrato che l'uso di fertilizzanti nei tetti verdi accentua il rischio di contaminazione delle acque. Infatti, questi non riescono a trattenere nessun quantitativo significativo di fosforo (P) e azoto (N). Al contrario, sono capaci di intercettare i metalli pesanti come Zn e Pb.

Per ridurre al minimo le potenziali perdite di inquinanti dai tetti verdi, occorre prendere precauzioni durante la loro installazione e svolgere una corretta manutenzione.

## 2.4 Pavimentazioni permeabili (pervious pavements)

Le pavimentazioni permeabili [6] consentono ai pedoni e ai veicoli di circolare, e allo stesso tempo permettono l'infiltrazione delle acque meteoriche attraverso la superficie negli strati sottostanti. L'acqua viene temporaneamente immagazzinata, successivamente, una parte si infiltra nel terreno e una parte viene scaricata più a valle.

Tali strutture sono molto efficaci nella gestione delle portate superficiali, in quanto captano e trattano il deflusso.

I processi che avvengono all'interno della matrice e dello strato geotessile sono: l'infiltrazione, la filtrazione, l'adsorbimento, la biodegradazione e la sedimentazione.

Queste particolari pavimentazioni in base al tipo di materiale superficiale si distinguono in pavimentazioni porose e pavimentazioni permeabili.

Le prime permettono l'infiltrazione dell'acqua lungo tutta la superficie, come il calcestruzzo e l'asfalto poroso, la ghiaia legata con la resina e le superfici rinforzate di erba e ghiaia.

Le seconde, invece, sono costituite da elementi impermeabili (blocchi), che vengono posizionati lasciando delle intercapedini, in modo che l'acqua piovana possa infiltrarsi negli strati sottostanti.

Esistono diverse tipologie di superfici utilizzate per la realizzazione delle pavimentazioni: blocchi di calcestruzzo o altro materiale, asfalto e cemento poroso, erba e ghiaia.

Nella **pavimentazione permeabile modulare** (figura 2.6.a) i blocchi solitamente sono di calcestruzzo, ma possono essere anche di argilla o di pietra naturale. Di fondamentale importanza per il drenaggio sono i giunti, che consentono all'acqua di penetrare in profondità. Tali strutture vengono solitamente impiegate per aree pedonali, parcheggi, passi carrai privati e in strade non eccessivamente trafficate.

L'**asfalto poroso** (figura 2.6.b) come il **cemento poroso** può costituire una pavimentazione permeabile, oppure può funzionare da supporto per le pavimentazioni a blocchi soggette al traffico di mezzi pesanti. Una funzione rilevante, svolta da questo asfalto, è l'assorbimento del rumore del traffico, con conseguente abbassamento dell'inquinamento acustico. Oltre che essere usate per parcheggi, strade leggermente trafficate e passi carrai privati, viene talvolta adottato per zone sportive come campi da gioco o piste di atletica.

Le **superfici rinforzate** sono formate da griglie in plastica o in cemento, riempite di erba o ghiaia. Questa soluzione è valida in zone leggermente trafficate, poiché l'erba deve avere il tempo di riprendersi. Per funzionare correttamente, il materiale utilizzato non deve essere eccessivamente compattato e l'erba deve adattarsi al clima locale.



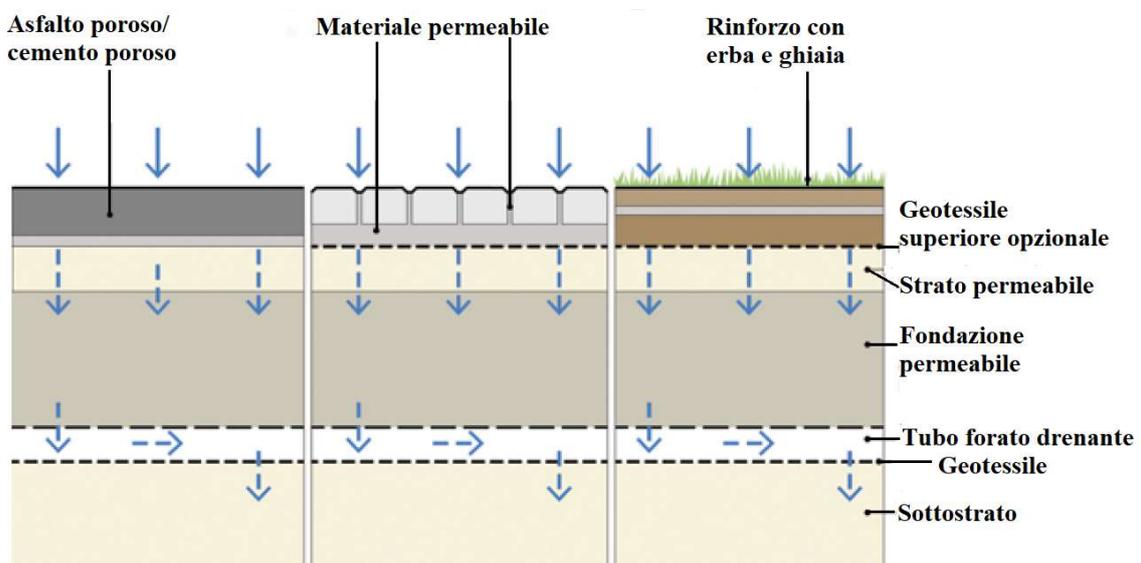
**Figura 2. 6 :** a) Parcheggio formato da pavimentazione modulare in blocchi [17].  
 b) Parcheggio dell'aeroporto delle Midlands Orientali con asfalto poroso [6].

Una volta che l'acqua riesce a passare al di sotto della superficie, può essere gestita in tre modi diversi.

Il primo metodo consiste nel far penetrare tutta l'acqua di precipitazione all'interno dello strato sottostante senza l'aiuto di alcun scarico. Nel caso si verificano degli eventi con tempo di ritorno maggiore rispetto a quello della progettazione, è necessario prevedere l'inserimento di dispositivi che permettano lo straripamento.

Nel secondo procedimento (figura 2.7) la porzione di acqua, che non riesce ad infiltrarsi nel terreno, viene incanalata nel sistema di drenaggio ricevente. Tale passaggio può avvenire attraverso dei tubi forati o l'infiltrazione diretta attraverso lo strato della base.

Nel terzo metodo non si verifica nessuna infiltrazione. Tutta la portata viene raccolta e trasportata fuori dal sistema tramite l'utilizzo di tubi o scarichi.



**Figura 2. 7 :** Pavimentazione permeabile con infiltrazione sottostante parziale [6].

La capacità di infiltrazione delle pavimentazioni drenanti è diversa da quella dei terreni sotto la struttura. Il suo valore di progetto solitamente è minore rispetto a quello reale della pavimentazione, e deve essere maggiore rispetto all'intensità dell'evento piovoso considerato. Il valore minimo imposto è di 2500 mm/h per le pavimentazioni nuove, in quanto con il tempo tendono ad intasarsi. Le ostruzioni di rado impediscono completamente il passaggio dell'acqua, e possono essere causate dall'accumulo di detriti, terriccio, limo e materiale da costruzione. Proprio per questo, è buona abitudine considerare un fattore di sicurezza pari a 10 per la velocità di infiltrazione, quindi il valore minimo visto sopra diventerà 250 mm/h.

Le pavimentazioni permeabili manifestano una buona attitudine a resistere a climi particolarmente rigidi. Infatti, l'acqua e la neve si sciolgono passando direttamente negli strati sottostanti, impedendo che si formi il ghiaccio in superficie.

Molti studi [7] mostrano che, al contrario delle pavimentazioni tradizionali, quelle permeabili trattengono gli inquinanti. All'interno di quest'ultime avvengono dei processi di trattamento come: la filtrazione delle sostanze solide, la biodegradazione degli elementi organici (benzina e diesel) e l'adsorbimento di materiale inquinante che si lega alle superfici presenti all'interno del sistema drenante. Le sostanze che solitamente possono essere trattenute sono i grassi (olio del motore), i batteri (*Escherichia coli* e streptococchi fecali) e i metalli (piombo, rame e zinco).

## 2.5 Sistemi di trincee (swale systems)

I sistemi di trincee (figura 2.8) sono dei canali inerbiti a fondo piatto, sfruttati per convogliare, trattare e attenuare il deflusso dell'acqua superficiale [6].



**Figura 2. 8** : Esempio di una trincea drenante [6].

La loro installazione può rimpiazzare le tubazioni convenzionali nel drenaggio di strade, sentieri e parcheggi.

In generale, il canale è largo, poco profondo e rivestito da vegetazione, la quale svolge dei ruoli molto importanti. Essa ostacola il passaggio dell'acqua, rallentandone la velocità, favorisce la sedimentazione, l'evapotraspirazione e l'infiltrazione nel terreno sottostante.

Le trincee vegetate solitamente hanno una struttura molto semplice che viene illustrata nell'immagine 2.9.



**Figura 2. 9** : Schematizzazione di un swale system [6].

In alcuni casi, sotto il canale può essere inserita una tubazione, che aumenta la capacità di trasporto ed evita i ristagni.

La sezione della trincea può essere trapezoidale o parabolica, dato che tali configurazioni sono le più semplici da realizzare e le migliori dal punto di vista delle prestazioni idrauliche. A livello di progettazione è consigliata una larghezza del fondo di 0,5-2,0 metri, che consente altezze d'acqua poco profonde e velocità basse che ostacolano le erosioni. Se si dovesse avere una larghezza maggiore di 2 m, è necessario dividere il flusso.

Nel caso in cui una trincea venga utilizzata per drenare una strada parallela, la sua ampiezza deve essere almeno pari alla lunghezza della strada.

Le sostanze inquinanti possono essere trattenute attraverso diversi processi.

La vegetazione superficiale blocca i sedimenti di medio grandi dimensioni, mediante il fenomeno della filtrazione, e le particelle fini, attraverso l'adsorbimento e la sedimentazione.

Per quanto riguarda i contaminanti organici, questi vengono rimossi grazie alla fotolisi e la volatilizzazione. Mentre i metalli disciolti vengono trattati per mezzo della biodegradazione e assorbiti dalle piante.

Si manifestano diversi tassi di rimozione degli inquinanti a seconda del tipo di terreno, della pendenza, della lunghezza, della vegetazione scelta e del tempo di permanenza dell'acqua nel canale.

I valori medi ricavati da diversi studi [7] testimoniano che si ha una rimozione del 55% per il fosforo, del 76 % per i solidi sospesi e del 50% per l'azoto totale.

L'installazione delle trincee drenanti deve essere in linea con il paesaggio limitrofo, in modo da valorizzarlo, migliorando l'estetica della zona circostante. Infatti, le specie vegetali devono essere scelte in modo da soddisfare le caratteristiche del paesaggio esistente, ma soprattutto senza scombusolare le specie native presenti.

Per poter assicurare il corretto funzionamento nel tempo, i canali richiedono una periodica ispezione e manutenzione.

## 2.6 Modelli di simulazione per le LID

I test sperimentali riguardanti i benefici delle LID sono utili ma limitati (eccessivo costo economico e impossibilità di valutare scenari a lungo termine), quindi è subentrata negli anni la necessità di servirsi dei modelli di simulazione.

Esistono due approcci per rappresentare le pratiche LID nella gestione delle acque meteoriche [7]:

- **Process representation approach** cerca di modellare i fenomeni (infiltrazione, sedimentazione, evapotraspirazione, trasformazione di inquinanti e assestamento) che si verificano all'interno delle LID. Un esempio del metodo di rappresentazione dei processi consiste nel simulare l'infiltrazione, l'evapotraspirazione e l'assorbimento di inquinanti in un sistema di bioretensione. Un problema riscontrato è il notevole costo computazione che ne consegue, ma in compenso si ottiene una modellazione dettagliata per la progettazione degli scenari di sviluppo.
- **Practice representation approach** rappresenta la pratica nel suo insieme tramite un metodo di aggregazione. Questo metodo riassume in un unico parametro tutti i complessi processi dovuti agli effetti del deflusso e della qualità dell'acqua. Ad esempio, gli effetti delle pavimentazioni permeabili, dei serbatoi, delle aree di bioretensione possono essere valutati con i valori del Curve Number. Poiché nell'applicazione del modello si introducono delle semplificazioni, i parametri non quantificano accuratamente ciò che realmente succede. Solitamente la rappresentazione pratica viene utilizzata per confrontare gli impatti idrologici causati da diversi tipi di scenari, in modo da sottolineare i benefici dovuti alle LID. Per questo motivo tale approccio viene utilizzato soprattutto nella fase decisionale e di pianificazione del progetto.

Per valutare il comportamento delle LID vengono elaborati degli algoritmi. Di seguito vengono riportati tre diversi modelli di simulazione computazionale, sviluppati con differenti livelli di complessità e con diversi approcci di rappresentazione.

### **2.6.1 Long-Term Hydrologic Impact Assessment–Low Impact Development**

L-THIA-LID viene normalmente impiegato nella scelta degli agenti che influenzano la qualità dell'acqua, è un modello afflussi-deflussi semplice da utilizzare, in cui si usa l'approccio di rappresentazione pratica.

Questo sistema di calcolo sfrutta il metodo del Curve Number (CN), per simulare i deflussi, e il metodo Event Mean Concentration (EMC), per determinare la riduzione media di concentrazione degli inquinanti. Il CN viene utilizzato all'interno di una formula empirica, questo permette di alleggerire il carico computazionale del modello, che altrimenti richiederebbe dati non disponibili o difficili da ottenere.

L-THIA-LID può essere utilizzato per analizzare le pratiche LID sia a scala di bacino che per un semplice lotto. Le LID che possono essere esaminate nel modello sono: i sistemi di bioretensione, i tetti verdi, i serbatoi, le pavimentazioni permeabili e le trincee inerbite.

### **2.6.2 Storm Water Management Model (SWMM)**

SWMM viene impiegato nella pianificazione e nella progettazione legate al deflusso delle acque di pioggia ed è più complesso rispetto al modello L-THIA-LID. La sua validità si estende sia per simulazioni riguardanti precipitazioni a lungo termine che eventi singoli.

La zona da analizzare viene suddivisa in una serie di sottobacini chiamati "subcatchment", i quali ricevono le acque meteoriche e le trasformano in deflussi tramite sistemi di collettori, elementi di stoccaggio/trattamento, canali, pompe, orifizi e regolatori. Inoltre, vi è la possibilità di sottrarre alla portata in ingresso nella rete di drenaggio gli effetti dovuti all'evapotraspirazione e all'infiltrazione del sottobacino. Poiché i fenomeni dovuti al ciclo idrologico dell'acqua vengono modellati, l'approccio rappresentativo utilizzato è basato sui processi (process based approach).

In origine SWMM fu concepito per la simulazione del sistema fognario, solo recentemente sono stati aggiunti degli algoritmi per modellare le pratiche LID, le quali vengono rappresentate attraverso la combinazione di layers verticali.

### **2.6.3 System for Urban Stormwater Treatment and Analysis INtegration**

Nella stima sia quantitativa che qualitativa delle portate prodotte dalle piogge, SUSTAIN sfrutta diverse tecniche. Questo modello di simulazione è complesso e serve per decidere quale pratica LID utilizzare, dove sia più opportuno posizionarla e se è possibile perfezionarla e migliorarla ulteriormente.

Per rappresentare i fenomeni dell'evapotraspirazione, infiltrazione, stoccaggio e instradamento degli inquinanti viene impiegato l'approccio basato sui processi (process-based).

Il software di programmazione supporta diverse tecniche: bioretensioni, cisterne e barili per la pioggia, pavimentazioni porose, laghetti, stagni, tetti verdi, bacini di infiltrazione e trincee drenanti.

## Capitolo 3

### Software di calcolo SWMM (Storm Water Management Model)

Per simulare il comportamento delle pratiche LID, inserite nella rete fognaria del caso studio esaminato in questa tesi, è stato utilizzato il software di calcolo EPA SWMM 5.1 (Storm Water Management Model). Prodotto e sviluppato dal Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency (US-EPA), è gratuitamente scaricabile dal sito:

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

#### 3.1 Informazioni generali su SWMM

SWMM [18], sviluppato per la prima volta nel 1971, è un modello fisicamente basato di gestione delle acque meteoriche, capace di simulare il fenomeno dinamico afflussi-deflussi per eventi singoli o a lungo termine (continui). In particolare, è in grado di valutare sia la quantità che la qualità delle acque di aree prevalentemente urbane.

Il programma opera trasformando le precipitazioni che si riversano su un insieme di aree, chiamate subcatchments, in deflusso. Quest'ultimo in parte viene trasportato tramite un sistema di canali, tubi, dispositivi di stoccaggio, sistemi di trattamento, pompe e regolatori, schematizzati in figura 3.1.

SWMM memorizza le variazioni temporali delle caratteristiche del deflusso prodotto in ogni area, e i cambiamenti subiti dalle portate che circolano all'interno di tubi e canali.

Il software è ampiamente utilizzato in tutto il mondo per la pianificazione, analisi e progettazione del deflusso delle acque meteoriche su reti fognarie miste o separate, perché considera una moltitudine di processi idrologici come: la variabilità delle precipitazioni nel tempo, l'evaporazione dell'acqua in superficie, l'accumulo e la fusione della neve, l'intercettazione della precipitazione, l'infiltrazione in strati del terreno, la percolazione in strati di acque sotterranee e il trattamento delle acque di precipitazione tramite l'uso delle LID.

L'analisi di tutti questi fenomeni nello spazio è possibile dividendo l'area di studio in altre più piccole e omogenee con determinate caratteristiche di permeabilità.



Figura 3. 1 : Elementi che fanno parte di un tipico sistema di drenaggio urbano.

Nella rappresentazione del sistema fognario è possibile gestire reti di estensione illimitata, usufruire di un'ampia scelta di forme di tubature e canali e modellare strutture particolari di trattamento e stoccaggio.

### 3.2 Modello concettuale

Il funzionamento di SWMM [18] si basa sullo scambio di flussi che avvengono tra quattro diversi blocchi.

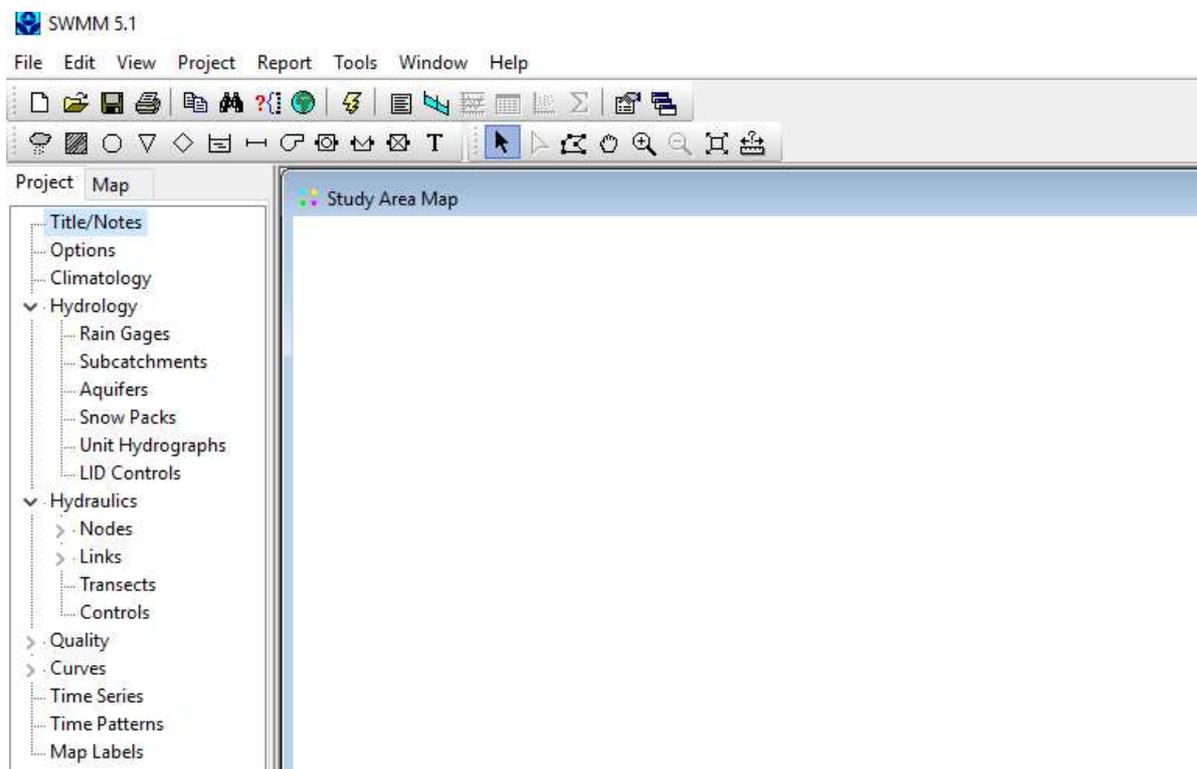
- Nel **comparto atmosfera** si origina l'evento atmosferico (pioggia o neve) che causa deflusso superficiale o infiltrazione nel modulo superficie terreno. L'input fornito dalla precipitazione viene modellato dall'oggetto "Rain Gage".
- Il **comparto superficie terreno** è descritto dall'insieme dei "subcatchment" che permettono al deflusso di infiltrarsi nel blocco acque sotterranee o di essere convogliato nella rete fognaria attraverso la sezione trasporto.
- Il **comparto acque sotterranee** riceve l'infiltrazione dal terreno e trasferisce parte degli efflussi al comparto trasporto. Per rappresentare tale fenomeno si utilizza l'oggetto "Aquifer".

- Il **comparto trasporto** è formato da elementi di convogliamento (canali, tubi, pompe e regolatori) e unità di stoccaggio che convogliano l'acqua verso il sistema di trattamento o direttamente ai nodi di uscita. I comandi "Node" e "Link" servono per riprodurre i componenti di tale blocco.

### 3.3 Rappresentazione del sistema di drenaggio

In SWMM [18] nella fase iniziale di progettazione si inseriscono i dati caratterizzanti la morfologia del territorio, la rete di drenaggio e gli eventi atmosferici.

All'avviamento del software si presenta l'interfaccia riportata in figura 3.2, in cui sono presenti i comandi principali per la realizzazione del modello.



**Figura 3. 2** : Finestra principale di SWMM.

### 3.3.1 Modulo idrologico (Hydrology)

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

- **Pluviometro (Rain Gage)**  serve per definire l'intensità della precipitazione in funzione del tempo. Tali informazioni possono essere fornite sia sottoforma di serie temporali determinate dall'utente o attraverso dei file esterni.

- **Sottobacini (Subcatchments)**  rappresentano delle porzioni di superficie, che grazie agli elementi topografici e al sistema di drenaggio dirigono il deflusso verso un punto di uscita, che può essere sia un nodo della rete o un altro subcatchment. L'utente decide come dividere l'area di studio e quale sarà il punto di uscita di ogni area. A sua volta, ogni subcatchment viene suddiviso in porzioni permeabili e impermeabili, in cui il deflusso potrà o meno infiltrarsi.

L'infiltrazione può essere calcolata scegliendo tra il modello di Horton, Horton modificato, Green-Ampt, Green-Ampt modificato e il metodo del Curve Number.

Per determinare il carico di inquinanti, dovuto al dilavamento della superficie, è necessario assegnare un determinato utilizzo al terreno del subcatchment. Inoltre, è possibile simulare il drenaggio sostenibile attraverso l'inserimento di determinati controlli LID pre-progettati.

I parametri che l'utente deve assegnare per la completa definizione del subcatchment sono: evento piovoso (rain gage), nodo o subcatchment di uscita, impermeabilità, pendenza e numero di Manning (sia per la parte impermeabile che permeabile).

### 3.3.2 Modulo idraulico (Hydraulics)

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

- **Giunzioni (Junctions Nodes)**  definiscono i punti dove i "links" (condotte, canali e tubazioni) si uniscono. Per descriverli è opportuno definire: invert elevation (elevazione dal fondo del canale o tombino), altezza dalla superficie del terreno, superficie inondata durante l'allagamento e i dati di afflusso esterno.
- **Scarichi (Outfalls Nodes)**  sono dei nodi terminali e stabiliscono i punti di uscita dell'acqua nella rete. Questi, al contrario delle giunzioni, possono essere collegati a una sola condotta.

- **Separatori di portata (Dividers Nodes)**  consentono di dividere la portata di un condotto e possono avere al massimo due elementi collegati sul lato di scarico. Questi particolari nodi vengono considerati tali solo nel caso del modello di flusso costante e dell'onda cinematica, mentre vengono ridotti a delle semplici giunzioni nel caso dell'onda dinamica.

A seconda di come gli afflussi vengono deviati, esistono quattro diversi tipi di deviatori di flusso: cutoff divider, overflow divider, tabular divider e weir divider.

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

$$Q_{div} = C_w \left( \frac{Q_{in} - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} H_w \right)^{1.5} \quad (3.1)$$

con  $C_w$  = coefficiente di sbarramento,  $Q_{in}$  = afflusso nel divisore,  $Q_{min}$  = valore di portata per cui inizia la deviazione,  $H_w$  = altezza di sbarramento e  $Q_{max} = C_w H_w^{1.5}$ .

- **Accumulo (Storage Node)**  sono nodi del sistema di drenaggio che forniscono un volume di archiviazione. Possono rappresentare sia delle strutture di stoccaggio molto piccole che molto grandi. Oltre che permettere l'entrata e lo scarico d'acqua, essi considerano l'evaporazione superficiale e l'infiltrazione nel suolo.
- **Condotti (Conduits)**  sono dei tubi o canali che trasportano l'acqua da un nodo ad un altro. Possono avere le più svariate geometrie: circolare, rettangolare, trapezoidale, triangolare, ellittica, ad arco, parabolica, a ferro di cavallo, irregolare... Ma solitamente la maggior parte dei tubi di drenaggio sono circolari e i canali di scolo hanno tradizionalmente forme ellittiche o ad arco.

Per calcolare la portata, SWMM sfrutta l'equazione di Manning:

$$Q = \frac{1.49}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (3.2)$$

dove  $Q$  = portata,  $A$  = area sezione trasversale,  $R$  = raggio idraulico,  $S$  = pendenza,  $n$  = coefficiente di Manning.

La pendenza  $S$ , a seconda del modello di flusso utilizzato, viene interpretata come pendenza del condotto o pendenza della perdita di carico dovuta all'attrito.

- **Pompa (Pump)**  sono dei sistemi impiegati per sollevare l'acqua a quote più elevate, infatti, talvolta non è possibile costruire delle fognature che funzionino a gravità. SWMM supporta cinque diversi tipi di funzionamento della pompa.
- **Orifizi (Orifices)**  servono per modellare le strutture di scarico e di deviazione nelle reti di drenaggio. 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 orifizio completamente aperto è calcolato come:

$$Q = CA\sqrt{2gh} \quad (3.3)$$

Con Q = portata, C = coefficiente di scarico, A = sezione dell'apertura dell'orifizio, g = accelerazione di gravità, h = differenza di carico tra il nodo di valle e quello di monte.

- **Sbarramento (Weir)**  modellano gli scolmatori/sbarramenti posizionati all'interno della rete di drenaggio (in un tombino o lungo il lato di un canale) o nei serbatoi. Come gli orifizi, rappresentano un collegamento tra due nodi. Poiché si possono verificare delle inversioni di flusso, può essere inserita una valvola. Esistono nel software cinque differenti tipi di sbarramento, ognuno con una formula diversa per la portata.
- **Uscita (Outlet)**  sono dei dispositivi che controllano la portata in uscita dai serbatoi di accumulo, dotati in alcuni casi di una valvola, per limitare il flusso in una sola direzione. Essi sono rappresentati nel software come collegamento tra due nodi.

### 3.3.3 Modulo qualità (Quality)

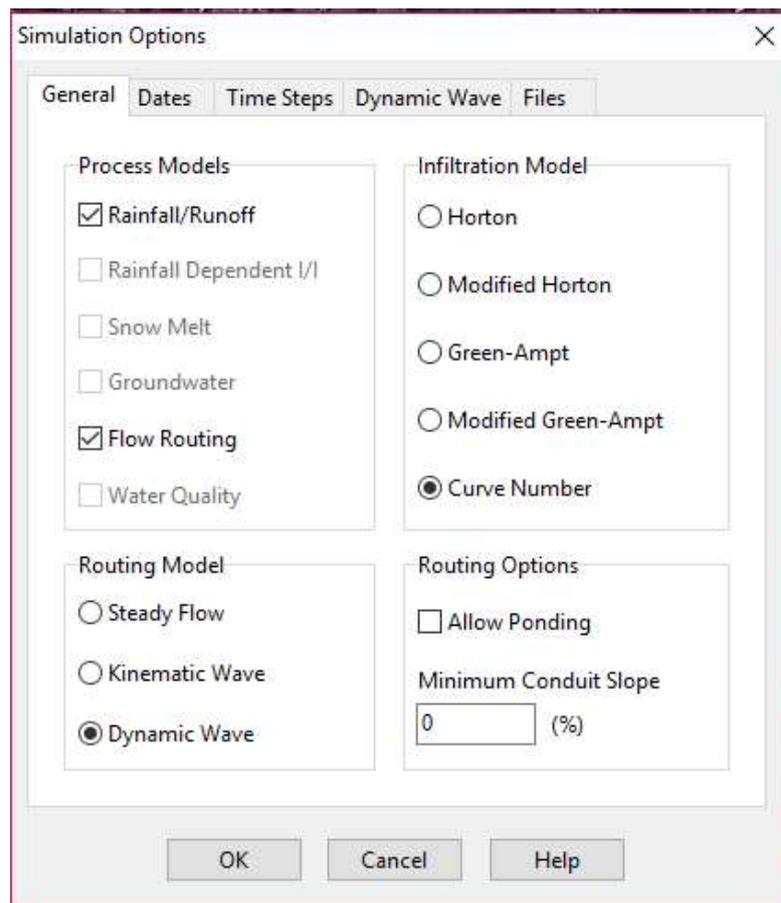
Il modulo qualità può definire uno o più inquinanti presenti nei subcatchments, valutandone l'origine e la propagazione lungo la rete.

- Con il comando **Inquinanti (Pollutants)**, SWMM riesce a simulare l'origine e il percorso intrapreso da ogni contaminante che viene presentato. Per la loro definizione è necessario stabilire l'unità di misura, la concentrazione nelle piogge, nelle acque sotterranee e in quelle superficiali.  
L'accumulo e il dilavamento di inquinanti sono funzione degli usi del suolo.
- **Usi del suolo (Land Uses)** sono delle caratteristiche che vengono assegnate ai subcatchments. Alcuni esempi sono suoli residenziali, commerciali, industriali e non sviluppati. Tali informazioni vengono valutate esclusivamente per tener conto della variazione spaziale dell'accumulo di inquinanti.

### 3.4 Opzioni di Simulazione (Simulation Options)

SWMM è un modello fisicamente basato, che utilizza il principio di conservazione della massa, dell'energia e, dove possibile, dell'impulso. I processi fisici, che si manifestano durante il ciclo idrologico, possono essere modellati settando le opzioni di simulazione generali [18].

La figura 3.3 è stata presa dalla progettazione su SWMM svolta nel caso studio di questa tesi.



**Figura 3.3** : Finestra “Simulation Option” di EPA SWMM.

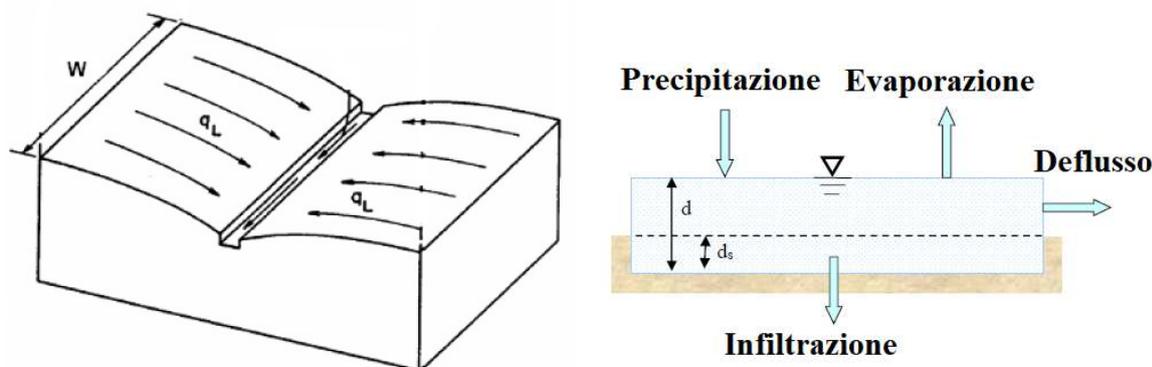
A seguire vengono illustrate le equazioni che governano il funzionamento generale del software ([19], [20]).

#### 3.4.1 Deflusso superficiale

SWMM, come visto precedentemente, è un modello distribuito, che permette di ripartire l'area di studio in un numero qualsiasi di aree (subcatchments) di forma irregolare. Queste rappresentano al meglio gli effetti che la variabilità spaziale, i percorsi di drenaggio e le caratteristiche del suolo hanno sulla generazione del deflusso.

Inoltre, vengono formalizzate dal programma come superfici rettangolari con pendenza uniforme  $S$  e larghezza  $W$ , che sfruttano un unico canale di uscita (figura 3.4.a).

Il software trasforma l'eccesso di pioggia in deflusso superficiale attraverso un modello non lineare di serbatoi (figura 3.4.b).



**Figura 3. 4:** a) Rappresentazione del concetto di subcatchment [19]. b) Modello non lineare di serbatoi [19].

In questa rappresentazione, l'afflusso dovuto alla precipitazione si può trasformare in infiltrazione, evaporazione o deflusso (qualora vi sia un ristagno al di sopra della superficie). Dalla conservazione della massa, la variazione netta della profondità  $d$  per unità di tempo è pari alla differenza tra gli afflussi e deflussi nella zona.

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (3.4)$$

Con  $i$  = quantità di pioggia (ft/s),  $e$  = tasso di evaporazione (ft/s),  $f$  = infiltrazione (ft/s),  $q$  = deflusso superficiale (ft/s).

Supponendo che quest'ultimo si comporti come una portata uniforme all'interno di un canale rettangolare, si potrà utilizzare l'equazione di Manning (3.2).

Osservando la figura 3.4.b, l'area in cui passa il flusso, sarà data dalla larghezza equivalente del subcatchment  $W$  (width) per l'altezza  $d - d_s$  ( $d_s$  è la profondità di stoccaggio). Poiché  $W$  è sempre molto più grande rispetto a  $d$ , il raggio idraulico sarà pari a  $d - d_s$ . Per ottenere una portata per unità di superficie, è necessario dividere l'equazione (3.2) per l'area dell'intero sottobacino:

$$q = \frac{1.49W\sqrt{S}}{An} (d - d_s)^{5/3} \quad (3.5)$$

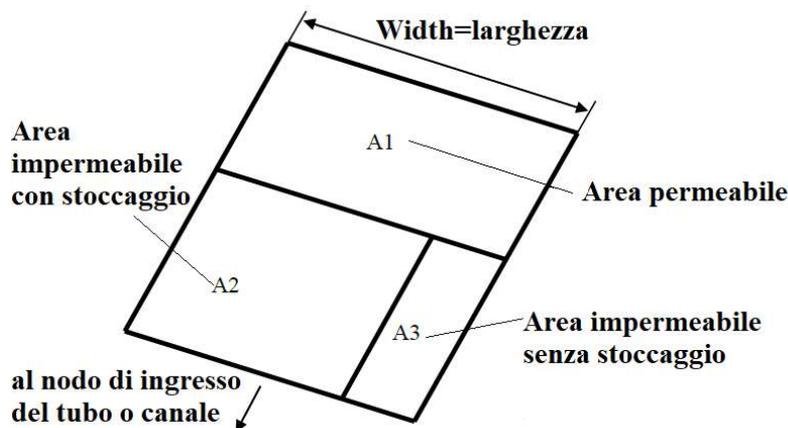
Sostituendo l'equazione (3.5) in (3.4) e definendo  $\alpha = (1.49W\sqrt{S}/An)$  si ha:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha(d - d_s)^{5/3} \quad (3.6)$$

L'equazione (3.6) è un'equazione differenziale non lineare ordinaria. Conoscendo i valori di  $i$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $d_s$  e  $\alpha$ , viene risolta numericamente per ogni intervallo temporale, ricavando  $d$ . Inserendo  $d$  nell'equazione (3.5) si ricava il deflusso superficiale per unità di superficie  $q$ .

Nelle aree urbane esistono due tipi di superfici: permeabili (come prati, campi e aree boschive) e impermeabili (ad es. strade, tetti e parcheggi). Pertanto, SWMM permette al subcatchment di avere zone permeabili e impermeabili, attraverso la definizione da parte dell'utente del parametro "Percent Imperviousness".

Solitamente, durante un evento piovoso, le superfici impermeabili generano deflusso prima che si riempia il serbatoio di stoccaggio. Per simulare questo comportamento, il software suddivide la zona in cui non è possibile l'infiltrazione in due sottoaree: una che immagazzina l'acqua, l'altra che favorisce il deflusso. Il comando "% Zero Imperv" stabilisce quale frazione dell'area impermeabile di un sottobacino non permette il deposito. In conclusione, nel caso in cui non ci siano dei sistemi LID, il subcatchment può essere suddiviso in tre parti (figura 3.5).



**Figura 3. 5:** Formalizzazione della partizione del sottobacino per il deflusso superficiale [19].

Nella realtà le aree A1, A2 e A3 non sono necessariamente posizionate in questo modo e scaricano il loro deflusso indipendentemente l'una dall'altra nello stesso nodo di uscita.

Data questa precisazione, l'equazione differenziale (3.6) viene risolta separatamente per ogni sottoarea e, alla fine dell'istante temporale, le portate prodotte da ogni zona vengono combinate insieme per formare il deflusso totale del subcatchment.

### 3.4.2 Infiltrazione

La pioggia attraverso l'infiltrazione penetra nel terreno, riempiendo i vuoti degli strati sottostanti. Tale processo viene teorizzato dall'equazione differenziale di Richards, che mette in relazione la permeabilità del suolo con la tensione dei pori in funzione del contenuto di umidità del suolo. L'equazione però è altamente non lineare, quindi inadatta per essere usata in SWMM. Per questa ragione, sono stati sviluppati diversi modelli algebrici più semplici per l'infiltrazione. Nel programma è possibile scegliere fra: il modello di Horton, Horton modificato, Green-Ampt, Green-Ampt modificato e il metodo del Curve Number.

Nel progetto svolto in questa tesi è stato utilizzato il metodo del **Curve Number (CN)**.

Esso si basa sul metodo SCS (Soil Conservation Service, noto come NRCS - Natural Resource Conservation Service) per valutare la quantità di precipitazione che penetra nel terreno. Il CN, per determinare il deflusso superficiale, calcola le perdite combinate dovute all'infiltrazione, al deposito e all'intercettazione. In SWMM, poiché le perdite dovute al deposito e all'intercettazione vengono già conteggiate in altre parti, si utilizza un metodo modificato, che fa riferimento solo all'infiltrazione.

L'equazione sfruttata nel metodo del CN, che lega il deflusso totale (Q) con la precipitazione (P) è la seguente:

$$Q = \frac{P^2}{P+S_{max}} \quad (3.7)$$

$S_{max}$  è la capacità idrica massima del suolo o volume specifico di saturazione (differenza di volume d'acqua tra un terreno completamente saturo e un terreno completamente drenato). Esso è ricavabile a partire da una tabella che contiene appunto i valori del CN (Curve Number), che variano in base alle caratteristiche del terreno e alle condizioni precedenti l'evento.

$$S_{max} = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3.8)$$

Se per ipotesi le precipitazioni che non diventano deflusso superficiale si trasformano in infiltrazione ( $P-Q=F$ ), l'equazione (3.7) diventa:

$$F = P - \frac{P^2}{P+S_{max}} \quad (3.9)$$

SWMM, essendo un modello continuo, sfrutta l'equazione (3.9) in modo incrementale, ovvero calcola un tasso di infiltrazione per ogni passo temporale.

Se  $P_1$  e  $F_1$  rappresentano rispettivamente la precipitazione e l'infiltrazione all'inizio della fase temporale, alla fine si avrà:

$$P_2 = P_1 + i\Delta t \quad (3.10)$$

$$F_2 = P_2 - \frac{P_2^2}{P_2 + S_e} \quad (3.11)$$

I valori  $F_2$  e  $P_2$  sono i valori ottenuti alla fine della fase temporale  $\Delta t$ ,  $i$  è l'intensità di pioggia e  $S_e$  è la capacità idrica di accumulo del suolo all'inizio dell'evento piovoso.

Il tasso di infiltrazione quindi sarà pari a:

$$f = \left( \frac{F_2 - F_1}{\Delta t} \right) \quad (3.12)$$

e i valori di precipitazione  $P_2$  e filtrazione  $F_2$  appena ricavati diventeranno i nuovi valori iniziali  $P_1$  e  $F_1$  del successivo passo temporale.

### 3.4.3 Modello di calcolo: Onda Dinamica

In SWMM è possibile utilizzare tre modelli: flusso costante, onda cinematica e onda dinamica. Nell'analisi svolta in questa tesi è stato utilizzato il modello dell'onda dinamica. Il moto dell'acqua all'interno di una rete di canali e condotte è governato dalla conservazione delle equazioni della massa e della quantità di moto. Il metodo dell'onda dinamica svolge in modo completo la risoluzione di queste equazioni, fornendo dei risultati teoricamente più precisi, ma utilizzando piccoli passi temporali, per mantenere la stabilità numerica.

Le equazioni che rispondono a queste esigenze sono conosciute in letteratura come le equazioni di De Saint-Venant:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Continuità} \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad \text{Quantità di moto} \quad (3.14)$$

Con  $x$  = distanza,  $A$  = superficie attraverso cui passa la portata,  $Q$  = portata,  $H$  = carico idraulico ( $Z+Y$ ),  $t$  = tempo,  $Z$  = elevazione della condotta rispetto al fondo,  $Y$  = altezza d'acqua nella condotta,  $S_f$  = perdite di carico per unità di lunghezza (pendenza d'attrito),  $g$  = accelerazione di gravità.

Per ricavare le perdite di carico si può partire utilizzando l'equazione di Manning vista sopra:

$$S_f = \left( \frac{n}{1.49} \right)^2 \frac{Q|U|}{AR^{4/3}} \quad (3.15)$$

Dove  $n$  = coefficiente di scabrezza di Manning,  $R$  = raggio idraulico e  $U$  = velocità dell'acqua.

Per una determinata area geometrica del condotto, la superficie  $A$  attraverso cui passa la portata è funzione dell'altezza d'acqua  $Y$ , che può essere ricavata dal carico idraulico  $H$ .

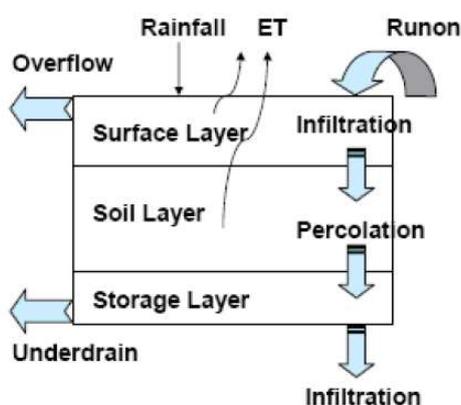
Quindi, le variabili dipendenti sono  $Q$  e  $H$ , funzioni di spazio e tempo, a cui devono essere abbinate delle condizioni iniziali all'istante 0 (zero) e condizioni al contorno per  $x = 0$  e  $x=L$  ( $L$  è la lunghezza della condotta).

Se si combinano assieme l'equazione (3.13) e (3.14) si ricava:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} - gA \frac{\partial H}{\partial x} - gAS_f \quad (3.16)$$

### 3.5 Rappresentazione delle LID

In SWMM [18] le pratiche LID vengono descritte attraverso un insieme di strati verticali chiamati layers, in cui avvengono i fenomeni dell'infiltrazione, percolazione e stoccaggio. Si mostra di seguito l'idealizzazione del concetto di layers verticali per un sistema di bioretensione (figura 3.6).



**Figura 3. 6** : Diagramma concettuale per un sistema di bioretensione [18].

**Surface Layer** (strato superficiale) rappresenta lo strato superficiale (terreno o pavimentazione) che riceve direttamente l'acqua proveniente dalle piogge e dal deflusso prodotto dalle aree a monte. Il suo compito è quello di stoccare l'afflusso in eccesso nel "depression storage", ma una volta superata questa capacità, produce deflusso superficiale che si riversa nel sistema di drenaggio o fluisce nelle zone più a valle.

**Pavement Layer** (strato di pavimentazione), usato solo nel caso di pavimentazioni permeabili, corrisponde allo strato di calcestruzzo o di asfalto permeabile nei sistemi continui, in quelli modulari ai blocchi e al materiale di riempimento.

**Soil Layer** (strato di terreno) è la miscela di suolo che nelle pratiche LID, che prevedono l'utilizzo di vegetazione, favorisce la crescita delle piante attraverso il rilascio graduale di sostanze nutritive. Nel caso della pavimentazione drenante, è lo strato di sabbia posto tra il pavement layer e lo storage layer, che permette la filtrazione.

**Storage Layer** (strato di stoccaggio) rappresenta il piano di roccia frantumata o ghiaia che garantisce il deposito d'acqua nelle aree di bioretensione, nelle pavimentazioni permeabili e nelle trincee drenanti.

**Drain System** (sistema di scarico) trasporta l'acqua dello storage layer verso l'uscita attraverso una comune tubazione o camera.

**Drainage Mat** (tappeto di drenaggio) è una specie di tappeto utilizzato per i tetti verdi, serve per trattenere l'acqua che penetra dallo strato di terreno soprastante il tetto.

Nella tabella 3.1 vengono specificate le combinazioni di layers che vi sono in ogni tipo di LID in SWMM (X significa richiesta, O opzionale).

Tipo di LID	Superficie	Pavimentazione	Terreno	Stoccaggio	Scarico	Tappeto
Bioretensioni	X		X	O	O	
Rain Gardens	X		X			
Tetti verdi	X		X			X
Pavimentazioni Permeabili	X	X	O	X	O	
Trincee	X			X	O	
Serbatoi				X	X	
Disconnessioni dei Tetti	X				X	

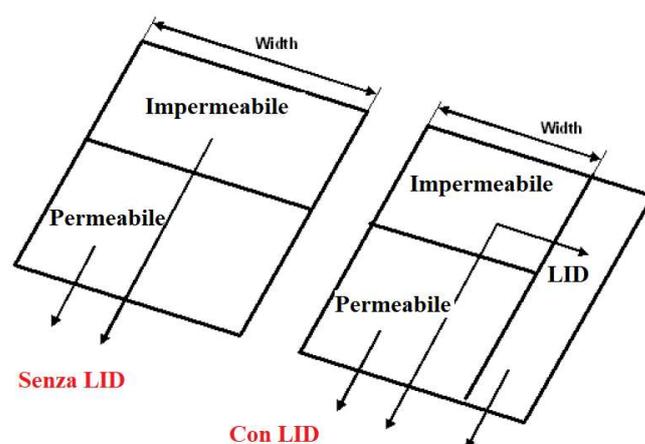
**Tabella 3. 1:** Layers utilizzati per modellare le differenti unità LID.

L'infiltrazione nel suolo naturale al di sotto delle LID è permesso solo in alcuni casi: per le aree di bioretensione, per i rain garden, per le pavimentazioni permeabili e per le trincee di infiltrazione. È necessario sottolineare che talvolta le bioretensioni e le trincee possono intasarsi e abbassare le loro prestazioni dal punto di vista idraulico.

Le LID possono essere inserite all'interno di un subcatchment in due modi diversi:

- collocando una o più tecniche LID in un subcatchment esistente;
- definendo un nuovo subcatchment, interamente dedicato a una singola pratica LID.

Il primo approccio permette di sfruttare in un solo sottobacino diverse tecniche LID, le quali trattano volumi diversi di deflusso generato dalle aree non LID. In questo caso le LID lavorano in parallelo, ovvero la portata in uscita di una tecnica LID diventa l'afflusso di un'altra. Se si sceglie questo metodo, è necessario ricalibrare le proprietà "Percent Impervious" e "Width", per compensare la frazione di subcatchment che è stata occupata dalla LID (figura 3.7).



**Figura 3. 7** : Sistemazione delle caratteristiche del sottobacino dopo l'inserimento delle LID [18].

Il secondo approccio permette alle LID di essere collegate in serie e quindi di convogliare il deflusso proveniente da monte. Se una LID occupa l'intero subcatchment, i valori assegnati alle proprietà specifiche standard del subcatchment (come pendenza, scabrezza, impermeabilità...) vengono ignorate.

Nella presente tesi verrà utilizzato il secondo approccio.

Solitamente, sia le portate superficiali che quelle prodotte dalle LID vengono convogliate nello stesso punto di uscita, designato per il subcatchment principale. Tuttavia, è possibile immettere il flusso prodotto dalle LID nella porzione di area permeabile o instradarlo in un nuovo punto di raccolta.

### 3.6 Equazioni governanti il funzionamento delle LID

Nel seguente paragrafo verranno trattate solo le equazioni riguardanti le LID utilizzate nel progetto della presente tesi.

In SWMM [21] i controlli LID fanno parte dell'oggetto "Subcatchment" e, una volta inseriti, vanno ad occupare una percentuale dell'area impermeabile. Le variabili di progettazione includono le proprietà del materiale (suolo e ghiaia) contenuto all'interno dell'unità, la profondità dei layer verticali, la capacità idraulica dell'eventuale sistema di scarico e la superficie dell'area stessa.

Nonostante molte LID riescono a trattenere gli inquinanti, purtroppo ad oggi non è possibile simulare tale comportamento in SWMM, si può solo valutare la riduzione del deflusso.

Il software di calcolo tratta i controlli LID come elementi discreti, sfruttando la rappresentazione basata sui processi, che fornisce un grado di accuratezza accettabile nella simulazione dinamica.

#### 3.6.1 Aree di bioretensione

Come visto nel paragrafo 3.5, le LID vengono concettualizzate attraverso dei layers verticali. In un sistema di bioretensione, lo strato superficiale (surface layer) capta sia la pioggia diretta che il deflusso proveniente dalle altre aree, perde acqua attraverso l'infiltrazione e l'evapotraspirazione. Lo strato di terreno (soil layer) riceve l'infiltrazione dallo strato superiore, perde acqua a causa della evapotraspirazione e della percolazione nello strato di stoccaggio inferiore. Lo strato di deposito (storage layer) accoglie la percolazione, rilascia acqua tramite l'infiltrazione nel terreno naturale e il deflusso per mezzo di un tubo forato del troppopieno, se presente.

Nella modellazione delle aree di bioretensione vengono fatte diverse ipotesi semplificative, in modo da poter utilizzare delle semplici equazioni di continuità, per gestire il comportamento dell'acqua.

- L'area della sezione trasversale del sistema è costante per tutta la sua profondità.
- La portata che passa attraverso la bioretensione è monodimensionale in direzione verticale.
- L'afflusso è distribuito uniformemente in superficie.
- L'umidità del soil layer è uniforme in tutto lo strato.
- Il comportamento dello storage layer viene idealizzato come quello di un semplice serbatoio che immagazzina l'acqua.

Ad ogni strato corrisponde una diversa equazione, che esprime la variazione del contenuto d'acqua nel tempo.

$$\Phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad \text{Surface Layer} \quad (3.18)$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad \text{Soil Layer} \quad (3.19)$$

$$\Phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad \text{Storage Layer} \quad (3.20)$$

Dove:

- $d_1$  = 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.

Questo sistema di equazioni viene risolto numericamente per ogni passo temporale, in modo da valutare come un idrogramma di afflussi nell'unità LID ( $i + q_0$ ) viene trasformato in deflusso superficiale ( $q_1$ ), in portata scaricata ( $q_3$ ) ed esfiltrazione ( $f_3$ ) all'interno del terreno naturale circostante, sotto la bioretensione.

### 3.6.2 Tetti verdi

La struttura dei tetti verdi è simile a quella di un sistema di bioretensione, ma nella prima viene usato un tappeto di drenaggio, mentre nella seconda un letto di ghiaia nello storage layer. I tappeti di drenaggio sono molto sottili con delle scanalature nella parte inferiore, che convogliano l'acqua. Questi ultimi hanno delle capacità di stoccaggio e drenaggio limitate, per questo vengono principalmente utilizzati su tetti inclinati.

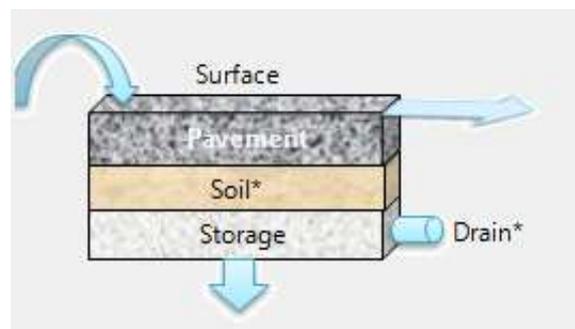
Le equazioni che governano il funzionamento dei tetti verdi sono uguali a quelle sfruttate per i le aree di bioretensione, con due differenze:

- Nell'equazione (3.18) è assente il termine  $q_0$  dovuto al deflusso proveniente dalle altre aree, perché i tetti verdi trattano solamente la precipitazione che cade direttamente sopra di essi.
- Nell'equazione (3.20) manca il termine  $f_3$  dovuto all'esfiltrazione nel terreno, poiché la parte inferiore di un tetto verde è una membrana impermeabile.

### 3.6.3 Pavimentazioni permeabili

In figura 3.8 viene mostrata la tipica struttura di una pavimentazione permeabile, data da: uno strato superiore di asfalto o cemento permeabile, un filtro di sabbia opzionale e da uno strato di stoccaggio in ghiaia con un sistema di scarico opzionale.

Rispetto ai layers visti sopra per le bioretensioni e i tetti verdi, in questo caso esiste un nuovo strato di pavimentazione, caratterizzato da uno spessore  $D_4$ , dalla porosità  $\Phi_4$  e dalla permeabilità  $K_4$ . Per la pavimentazione modulare si aggiunge un altro parametro,  $F_4$ , rappresentante la porzione di superficie occupata dai blocchi impermeabili, altrimenti pari a 0 nel caso di pavimentazione continua.



**Figura 3. 8** : Rappresentazione concettuale di una pavimentazione permeabile [21].

Le equazioni che regolano il funzionamento di queste pratiche LID sono:

$$\frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad \text{Surface Layer} \quad (3.21)$$

$$D_4(1 - F_4) \frac{\partial \theta_4}{\partial t} = f_1 - e_4 - f_4 \quad \text{Pavement Layer} \quad (3.22)$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_4 - e_2 - f_2 \quad \text{Sand Layer} \quad (3.23)$$

$$\Phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad \text{Storage Layer} \quad (3.24)$$

Con  $\theta_4$  pari al contenuto di umidità del Pavement layer e  $f_4$  pari alla velocità con cui l'acqua fuoriesce dallo strato della pavimentazione (gli altri termini sono stati definiti in precedenza). Se non è presente il Sand layer, l'equazione (3.23) sparisce e  $f_4$  sostituisce  $f_2$  nell'equazione (3.24).

## 3.7 LID Editor

Per poter inserire delle pratiche LID all'interno di SWMM, durante la progettazione, è necessario compilare tutti i campi delle finestre: LID Control Editor, LID Group Editor, LID Usage Editor.

### 3.7.1 LID Control Editor

La funzione del LID Control Editor [18] è quella di determinare le caratteristiche fisiche dei layer verticali, come: spessore degli strati, pendenza, quantità di vegetazione, scabrezza, indice dei vuoti, permeabilità, fattore di intasamento, porosità, punto di appassimento, conduttività, suction head, infiltrazione e proprietà del dreno (se presente). I valori vengono definiti per unità di area, cosicché la LID descritta possa essere posizionata e replicata in qualsiasi subcatchment con la dimensione desiderata. Di seguito verranno mostrate le proprietà assegnate alle LID utilizzate per svolgere le analisi nella presente tesi.

#### LID Control Editor per aree di bioretensione

I sistemi di bioretensione sono caratterizzati dalla presenza di quattro layer verticali: surface layer, soil layer, storage layer e storage drain.

Lo strato che influenza maggiormente l'infiltrazione è il soil layer, perciò è fondamentale conoscere le caratteristiche del materiale che lo compone. La conduttività idraulica dipende principalmente dalla dimensione dei pori, quindi i materiali che permettono maggiormente l'infiltrazione sono quelli grossolani. Per questo motivo, la ghiaia costituisce il materiale principale dello scheletro, mentre la sabbia di quarzo forma il riempimento. Attualmente, non esiste alcuna norma che regola la composizione e il tipo di materiale da utilizzare, i dati disponibili per la progettazione sono del tutto empirici e ignorano il fatto che le prestazioni possano cambiare in base all'area geografica e climatica [22].

I dati in figura 3.9 sono stati presi direttamente dalla schermata di SWMM e sono stati ricavati dal confronto tra i valori riportati nel manuale "Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume III – Water Quality" e in due diversi articoli ([22], [23]).

Surface	Soil	Storage	Drain	Surface	Soil	Storage	Drain	Surface	Soil	Storage	Drain
Berm Height (in. or mm)		100		Thickness (in. or mm)		610		Thickness (in. or mm)		400	
Vegetation Volume Fraction		0.2		Porosity (volume fraction)		0.52		Void Ratio (Voids / Solids)		0.5	
Surface Roughness (Mannings n)		0		Field Capacity (volume fraction)		0.15		Seepage Rate (in/hr or mm/hr)		13	
Surface Slope (percent)		0		Wilting Point (volume fraction)		0.08		Clogging Factor		0	
				Conductivity (in/hr or mm/hr)		119					
				Conductivity Slope		39					
				Suction Head (in. or mm)		48					

**Figura 3.9:** Parametri per la definizione delle caratteristiche fisiche delle aree di bioretensione in SWMM.

Nello strato superficiale vengono definiti i seguenti valori:

- "Berm Height", il livello massimo che l'acqua può raggiungere al di sopra della superficie prima che si verifichi il trabocco.
- "Vegetation Volume Fraction", la frazione di volume occupata dalla vegetazione, rappresenta il volume ricoperto da steli e foglie, non la loro area di copertura. Nel caso di una crescita vegetativa molto densa si pone pari a 0.2.
- "Surface Roughness", il numero di Manning utilizzato per definire il deflusso superficiale, nel caso delle aree di bioretensione si pone uguale a 0.
- "Surface Slope" rappresenta la pendenza della superficie.

Lo strato di suolo viene determinato da:

- “Thickness”, lo spessore del terreno, che nel caso delle bioretensioni è compreso tra 450 e 900 millimetri.
- “Porosity”, il volume dei pori rispetto al volume totale del suolo.
- “Field Capacity”, il volume d’acqua interstiziale rispetto al volume totale dopo che il terreno è stato completamente drenato. Al di sotto di tale livello non si ha drenaggio verticale.
- “Wilting Point”, il limite inferiore del contenuto di umidità del suolo, rappresenta il volume d’acqua interstiziale rispetto al volume totale per un terreno asciutto, dove rimane solo acqua legata.
- “Conductivity”, la conducibilità idraulica per il suolo completamente saturo.
- “Conductivity Slope”, la pendenza della curva di log(conducibilità) rispetto al contenuto di umidità del suolo, i valori tipici variano da 30 a 60.
- “Suction Head”, il valore medio di aspirazione capillare lungo il fronte bagnato.

Lo strato di stoccaggio è rappresentato dai valori:

- “Thickness”, lo spessore dello strato di ghiaia.
- “Void Ratio”, il volume dei vuoti rispetto al volume di solido, i valori tipici variano tra 0,5 e 0,75.
- “Seepage Ratio”, la velocità con cui l’acqua filtra nel terreno naturale sotto la LID. In questo caso, per essere in condizioni di sicurezza, si è scelto il valore più basso proposto dai due articoli ([22], [23])
- “Clogging factor”, il fattore di intasamento che in questo caso viene trascurato.

L’inserimento dello scarico nello strato di stoccaggio è opzionale, pertanto in questo studio non è previsto il suo utilizzo.

### **LID Control Editor per Tetti verdi**

I tetti verdi scelti per tale studio sono di tipo estensivo e vengono modellati attraverso l’uso di tre strati: surface layer, soil layer e drainage mat.

Confrontando i valori del manuale “Storm Water Management Model - Reference Manual - Volume III – Water Quality” e quelli degli articoli [25], [26] e [27] sono stati ricavati i dati riportati in figura 3.10.

Surface	Soil	Drainage Mat	Surface	Soil	Drainage Mat	Surface	Soil	Drainage Mat
Berm Height (in. or mm)		<input type="text" value="40"/>	Thickness (in. or mm)		<input type="text" value="100"/>	Thickness (in. or mm)		<input type="text" value="20"/>
Vegetation Volume Fraction		<input type="text" value="0.15"/>	Porosity (volume fraction)		<input type="text" value="0.5"/>	Void Fraction		<input type="text" value="0.4"/>
Surface Roughness (Mannings n)		<input type="text" value="0"/>	Field Capacity (volume fraction)		<input type="text" value="0.4"/>	Roughness (Mannings n)		<input type="text" value="0.02"/>
Surface Slope (percent)		<input type="text" value="1.0"/>	Wilting Point (volume fraction)		<input type="text" value="0.07"/>			
			Conductivity (in/hr or mm/hr)		<input type="text" value="1000"/>			
			Conductivity Slope		<input type="text" value="15"/>			
			Suction Head (in. or mm)		<input type="text" value="75"/>			

**Figura 3. 10:** Parametri per la definizione delle caratteristiche fisiche dei tetti verdi in SWMM.

I dati relativi allo strato della superficie e del suolo, anche se diversi, hanno lo stesso significato di quelli utilizzati nelle aree di bioretensione.

Da puntualizzare che lo spessore del Soil Layer dei tetti verdi è minore rispetto a quello dei sistemi di bioretensione, infatti il valore del primo è compreso tra 75 e 150 millimetri.

Invece, la conducibilità idraulica è molto superiore rispetto a quella delle aree di bioretensione, nonostante sia stato preso il valore più basso proposto dalla tabella del manuale [21] di 40 pollici all'ora (ricavato da uno studio di A.G. Perelli [27]).

Solo nel caso dei tetti verdi è presente il layer dedicato alla piastra di separazione tra la struttura della LID e il tetto, definito da spessore, indice dei vuoti e numero di Manning. La sua funzione è quella di bloccare il passaggio dell'acqua nella parte sottostante.

### LID Control Editor per Pavimentazioni Permeabili

La pavimentazione permeabile impiegata è la tipologia più comune testata per la realizzazione di parcheggi. Essa è caratterizzata da mattoni in calcestruzzo permeabile (spessore di 8 cm) e da uno strato di stoccaggio formato da sabbia grossolana e ghiaia.

Gli strati più importanti che definiscono le caratteristiche di questa LID sono: surface layer, pavement layer e storage layer. Lo strato dedicato al suolo (soil layer) è opzionale e in letteratura solitamente il suo spessore viene posto pari a zero. I valori assegnati alle proprietà fisiche (figura 3.11) sono il frutto del confronto tra quelli riportati nel manuale [21] e quelli utilizzati in diversi studi ([24], [25], [26]).

Soil	Storage	Drain	Soil	Storage	Drain	Surface	Pavement	
Surface	Pavement		Surface	Pavement		Soil	Storage	Drain
Berm Height (in. or mm)	<input type="text" value="1"/>		Thickness (in. or mm)	<input type="text" value="80"/>		Thickness (in. or mm)	<input type="text" value="300"/>	
Vegetation Volume Fraction	<input type="text" value="0.0"/>		Void Ratio (Voids / Solids)	<input type="text" value="0.15"/>		Void Ratio (Voids / Solids)	<input type="text" value="0.4"/>	
Surface Roughness (Mannings n)	<input type="text" value="0.015"/>		Impervious Surface Fraction	<input type="text" value="0"/>		Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	<input type="text" value="3.3"/>	
Surface Slope (percent)	<input type="text" value="1.0"/>		Permeability (in/hr or mm/hr)	<input type="text" value="700"/>		Clogging Factor	<input type="text" value="0"/>	
			Clogging Factor	<input type="text" value="0"/>				
			Regeneration Interval (days)	<input type="text" value="0"/>				
			Regeneration Fraction	<input type="text" value="0"/>				

**Figura 3. 11:** Parametri per la definizione delle caratteristiche fisiche delle pavimentazioni permeabili in SWMM.

I dati relativi allo strato di superficie e di stoccaggio hanno lo stesso significato di quelli visti sopra per i sistemi di bioretensione e per i tetti verdi. Il layer dedicato alla pavimentazione viene definito da spessore, indice dei vuoti, permeabilità, frazione di superficie impermeabile, fattore di intasamento e intervallo di rigenerazione. Questi ultimi tre valori, per la pavimentazione scelta, vengono posti pari a zero. Infatti, la frazione di superficie impermeabile riguarda la porzione di materiale impermeabile che ricopre la zona, ma nel caso in questione vengono scelti dei blocchi permeabili; l'intervallo di rigenerazione si riferisce al tempo impiegato dalle superfici rinforzate ricoperte di erba e ghiaia per riformarsi, ma nella pavimentazione inserita non vengono previsti questi materiali.

### 3.7.2 LID Group Editor

Una volta determinate le caratteristiche fisiche di una pratica LID, è possibile collocarla all'interno di un subcatchment.

Il LID Group Editor serve per inserire, modificare ed eliminare una determinata tecnica di drenaggio urbano sostenibile, che sarà posizionata all'interno di un sottobacino. In particolare, mostra la percentuale di area occupata rispetto al sottobacino totale e la percentuale di area impermeabile trattata. Ovviamente, è necessario fare molta attenzione che queste percentuali non eccedano il 100%.

### 3.7.3 LID Usage Editor

Il LID Usage Editor specifica in che modo viene distribuita una pratica LID in un sottobacino. Essa può occupare l'intera area del subcatchment o solo una percentuale.

Nello studio svolto nella presente tesi si è preferito dedicare l'intera superficie del subcatchment ad una sola tecnica LID. In questo modo, si ha un maggiore controllo nel valutare il comportamento del sistema ed è possibile far defluire le portate dei sottobacini a monte, per essere trattati dai sistemi di drenaggio sostenibile più a valle.

Inoltre, all'interno di tale editor è necessario definire la larghezza equivalente (width) del sistema scelto, che viene calcolata dividendo l'area della LID per la media delle massime lunghezze di drenaggio.

Un altro dato molto importante è il parametro “% Initially Saturated”, che rappresenta la percentuale d'acqua inizialmente presente all'interno dell'unità LID. Nel caso dei tetti verdi sperimentalmente è stato ricavato un valore del 30% [25], per le bioretensioni 29% [22], mentre per le pavimentazioni permeabili si è scelto cautelativamente il valore 10%.

La percentuale di area impermeabile trattata viene posta pari a 0% perché la LID occupa tutta la superficie disponibile.





Per valutare il posizionamento delle pratiche LID, viene studiata più nel dettaglio un'area di circa 30 ettari, situata nel rione Borgo Dora. Il rione si trova in prossimità del centro storico cittadino e di Porta Palazzo, a nord di corso Regina Margherita, delimitato a ovest dal rione Valdocco e a nord dal fiume Dora Riparia (figura 4.1).

Borgo Dora [30] è un “quartiere popolare” con una forte identità storica e un forte senso di appartenenza, dovuti ad alcuni tratti caratteristici come: la storia, la forma urbana, la popolazione e l'attività economica. La storia urbanistica di questa zona è profondamente complessa.

In epoca romana, l'area chiamata attualmente “Balon” è una zona campestre, abitata da agricoltori. Nel medioevo il rione viene popolato inizialmente da mulini, cascinali e orti e, in seguito, da alcuni primordiali nuclei industriali. Verso il 1700, l'architetto Filippo Juvarra, su commissione del Re Vittorio Amedeo II, progetta la realizzazione di Piazza della Repubblica, che sancisce ufficialmente la saldatura fra la città di Torino e il Borgo Dora. Grazie all'attività commerciale e industriale e alla realizzazione della Piazza, all'inizio del XIX secolo, Borgo Dora rappresenta una delle aree più vive e floride della città. L'arrivo dell'energia elettrica e lo spostamento delle fabbriche portano la zona a perdere il primato preindustriale e a trasformarsi nel quartiere degli artigiani, degli antiquari e del mercato delle pulci del sabato.

A partire dall'ultimo decennio, l'area relativa all'attività commerciale, quindi Porta Palazzo e Borgo Dora, è soggetta a un'intensa riqualificazione ambientale, fisica ed economica, che ha come scopo il miglioramento del quartiere senza alterare la sua atmosfera e vitalità, mantenendo viva la sua storia e memoria.

Oltre agli edifici di comune abitazione e a quelli adibiti a esercizio commerciale e pubblico, nell'area di interesse si trova: la Scuola per Artigiani Restauratori e il Cortile del Maglio in Via Andreis interno 18; un ampio parcheggio, la piazza Borgo Dora (sede dell'aerostato HiFlyer) e la scuola Holden in Via Borgo Dora; la stazione di Torino Ponte Mosca, ormai sede del Museo Ferroviario Piemontese, in Lungo Dora Agrigento.



**Figura 4.2:** Area in cui sono state posizionate le LID. La mappa è stata ricavata dalla sovrapposizione della carta tecnica a colori con l'ortofoto del 2016 [29].

## 4.2 Modellazione idraulica della rete

### 4.2.1 Aree drenate

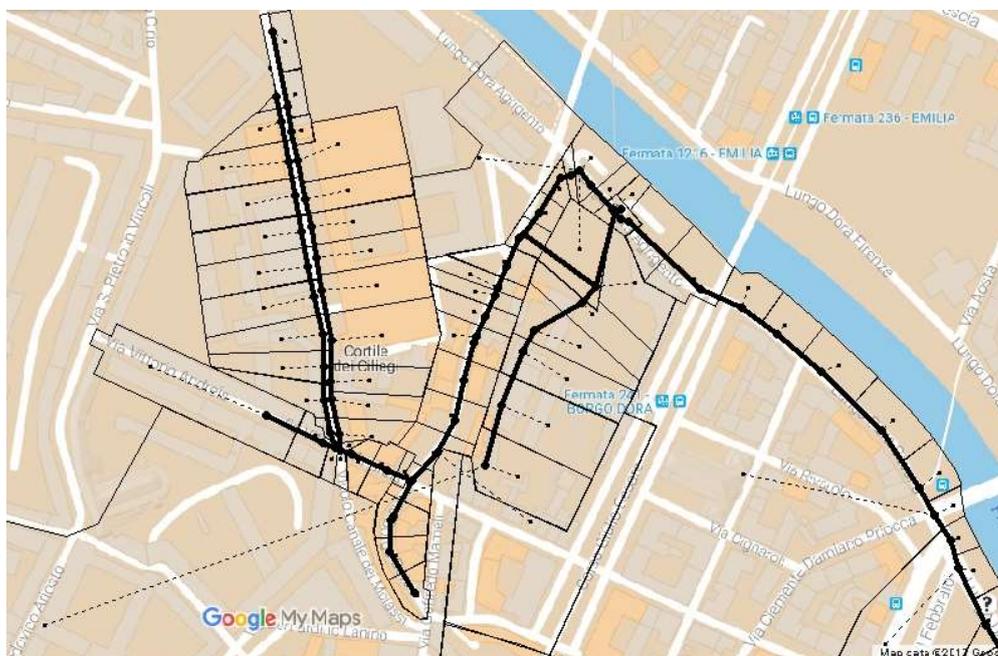
Nella modellazione in SWMM [28], le aree drenate vengono rappresentate come dei sottobacini. Per ogni evento di pioggia, i sottobacini producono una portata determinata dalla relazione (3.5), la quale dipende da: larghezza equivalente del sottobacino, coefficiente di scabrezza di Manning, pendenza del sottobacino, altezza d'acqua del sottobacino e volume specifico di immagazzinamento del bacino.

La larghezza equivalente si ricava dividendo la superficie del sottobacino per la media delle massime lunghezze di drenaggio, ipotizzando che l'acqua segua i percorsi definiti dalla sede stradale. Per i coefficienti di Manning si utilizzano i valori tipici impiegati per la progettazione idraulica urbana. Le pendenze sono valutate a partire dalle quote del terreno riportate nella cartografia esistente.

Le aree vengono discretizzate più fittamente in prossimità dei collettori che subiscono un allagamento (figura 4.2). La suddivisione dei sottobacini viene fatta in base alla posizione

dei chiusini, assegnando ad essi la portata generata dall'area compresa tra metà del tratto di collettore a valle e a monte.

L'infiltrazione viene calcolata attraverso il metodo del Curve Number (CN), imponendo un coefficiente pari a 98.



**Figura 4. 3:** Suddivisione delle aree in prossimità dei collettori.

#### 4.2.2 Collettori

Per definire la geometria dei collettori esistenti, è necessario impostare tre caratteristiche fondamentali: quota del fondo, lunghezza e sezione.

In Via Andreis, dall'incrocio con Via San Pietro in Vincoli fino al civico 28, non è presente nessuna condotta. In Via Andreis interno 18 vi sono due tubature, tutte e due di forma circolare, mentre in Via Andreis la forma è ovoidale.

In Via Borgo Dora il collettore ha geometria ovoidale e all'altezza del civico 33 aumenta di sezione.

Il collettore situato in Lungo Dora presenta delle eterogeneità dal punto di vista dimensionale, si alternano delle sezioni ovoidali, scatolari e a voltino. Inoltre, nel tratto terminale, prima di arrivare allo scarico, il collettore si divide in due condotti che si immettono all'interno del canale dei Molassi.

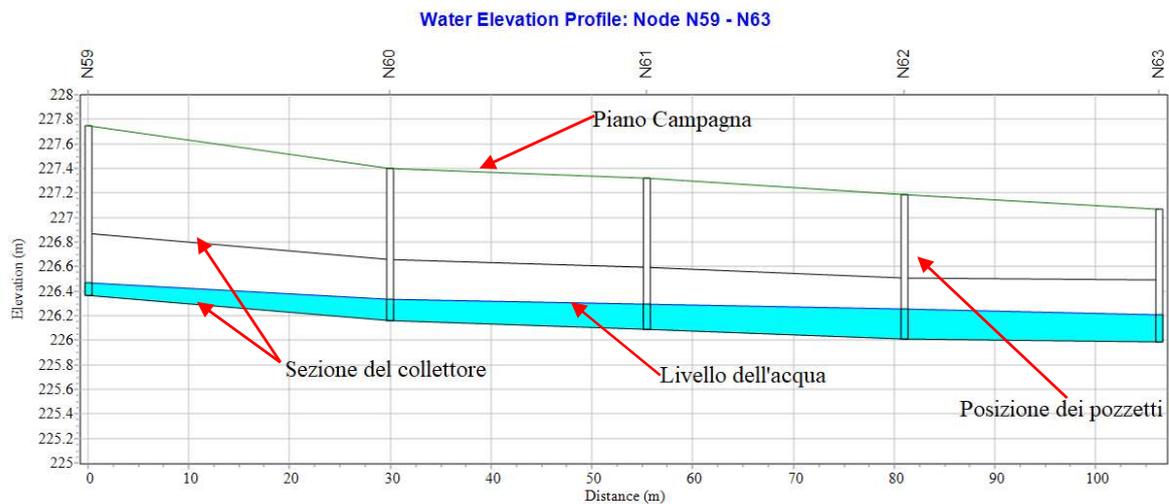
Un altro parametro molto importante nella descrizione dei collettori è la scabrezza. Nella tabella 4.1 vengono riportati i valori dei coefficienti di Gauckler-Strickler ( $K_s$ ) e Manning ( $n = 1/K_s$ ) ipotizzati nell'analisi.

**Tabella 4.1:** Coefficienti di Gauckler-Strickler ( $K_s$ ) e Manning ( $n$ ) per simulare la scabrezza all'interno dei collettori.

Materiale	$K_s$ [ $m^{1/3}/s$ ]	$n$ [ $s/m^{1/3}$ ]
c.a.	60	0,0170
PVC	70	0,0143
vari (Molassi)	50	0,0200

Il software utilizza l'equazione di Manning (3.2) per il calcolo delle portate all'interno dei collettori, ma, quando il condotto risulta essere in pressione, a tale relazione viene aggiunto un coefficiente per tener conto dell'aumento della cadente piezometrica.

Nell'analisi, per valutare gli allagamenti, è stato fondamentale ricreare i profili longitudinali dei collettori, impostando la profondità della tubazione rispetto al piano campagna. In figura 4.3 viene proposto un esempio di profilo longitudinale ottenuto con SWMM.



**Figura 4. 4:** Esempio di un profilo longitudinale ottenuto con SWMM.

### 4.3 Considerazioni idrologiche

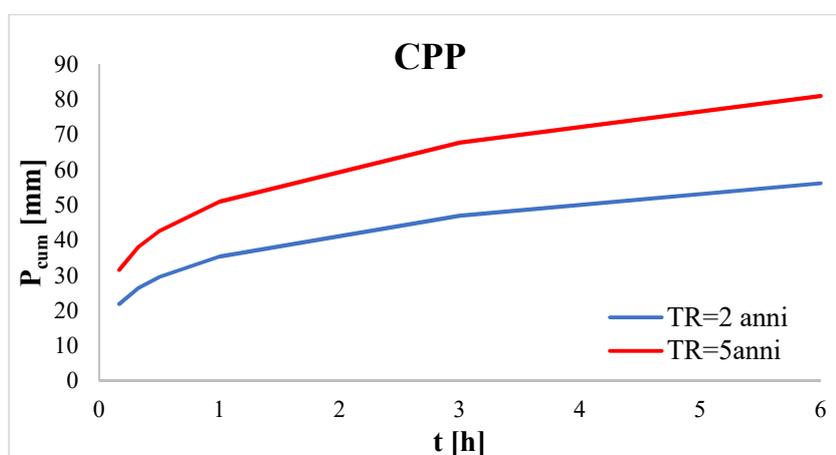
Gli eventi piovosi vengono simulati attraverso delle serie temporali, abbinando ad ogni time-step un determinato valore di intensità di pioggia. In seguito, l'evento viene associato a tutti i sottobacini presenti nel modello.

Per valutare le prestazioni della rete a differenti tempi di ritorno è opportuno definire degli ietogrammi di progetto. Per prima cosa si deve determinare la durata dello ietogramma, che corrisponde al tempo di corrivazione nelle sezioni di interesse all'interno della rete. In questo caso è stato osservato che, simulando un evento di pioggia, per tempi compresi tra 10 e 20 minuti, il livello dell'acqua raggiunge uno stato stazionario.

Nella realizzazione dello ietogramma, è necessario conoscere le curve di possibilità pluviometrica (CPP). Dato che la rete presenta già delle forti criticità per eventi abbastanza frequenti, si è scelto di prendere in considerazione le CPP con tempi di ritorno di 2 e 5 anni, i cui valori sono riportati nella tabella 4.2 e diagrammati in figura 4.4.

**Tabella 4.2:** Valori delle curve di possibilità pluviometrica (CPP), espressi in mm, fornite dall'Atlante delle Piogge Intense di Arpa Piemonte [31].

Durata	Tempo di ritorno 2 anni	Tempo di ritorno 5 anni
10 minuti	21,9	31,6
20 minuti	26,5	38,2
30 minuti	29,6	42,6
1 ora	35,4	51,0
3 ore	47,0	67,8
6 ore	56,2	81,0
12 ore	67,3	96,9
24 ore	80,4	115,9



**Figura 4. 5:** Le curve di possibilità pluviometrica ricavate dall'Atlante delle Piogge Intense di Arpa Piemonte per tempi di ritorno di 2 e 5 anni.

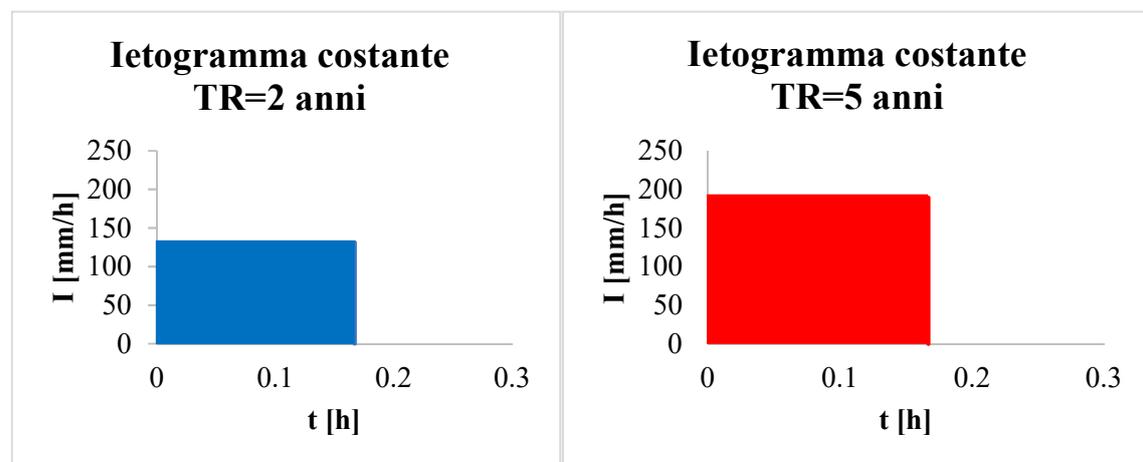
La situazione più sfavorevole, per la rete di drenaggio situata in zona Borgo Dora, si presenta nel caso dello ietogramma costante, quindi, per le analisi svolte nella tesi, viene scelto questo.

In tale ietogramma l'intensità assume valori costanti per un certo tempo definito. Dalle valutazioni effettuate si è nota che l'evento più gravoso in rete si riscontra per un tempo di 10 minuti. Per tale motivo, si è scelto di utilizzare le curve di possibilità pluviometrica relative ai volumi di pioggia cumulata in 10 minuti per i tempi di ritorno di 2 e 5 anni. Dai volumi di pioggia, vengono poi ricavate le intensità (tabella 4.3), che sono assunte costanti per la durata dell'evento.

In figura 4.5 vengono mostrati gli ietogrammi utilizzati nell'analisi per TR pari a 2 e a 5 anni.

**Tabella 4.3:** Altezze di pioggia e intensità per gli ietogrammi costanti con durata 10 minuti

Tempo di ritorno [anni]	$P_{cum}$ [mm]	I [mm/h]
2	21,9	131,40
5	31,6	189,60



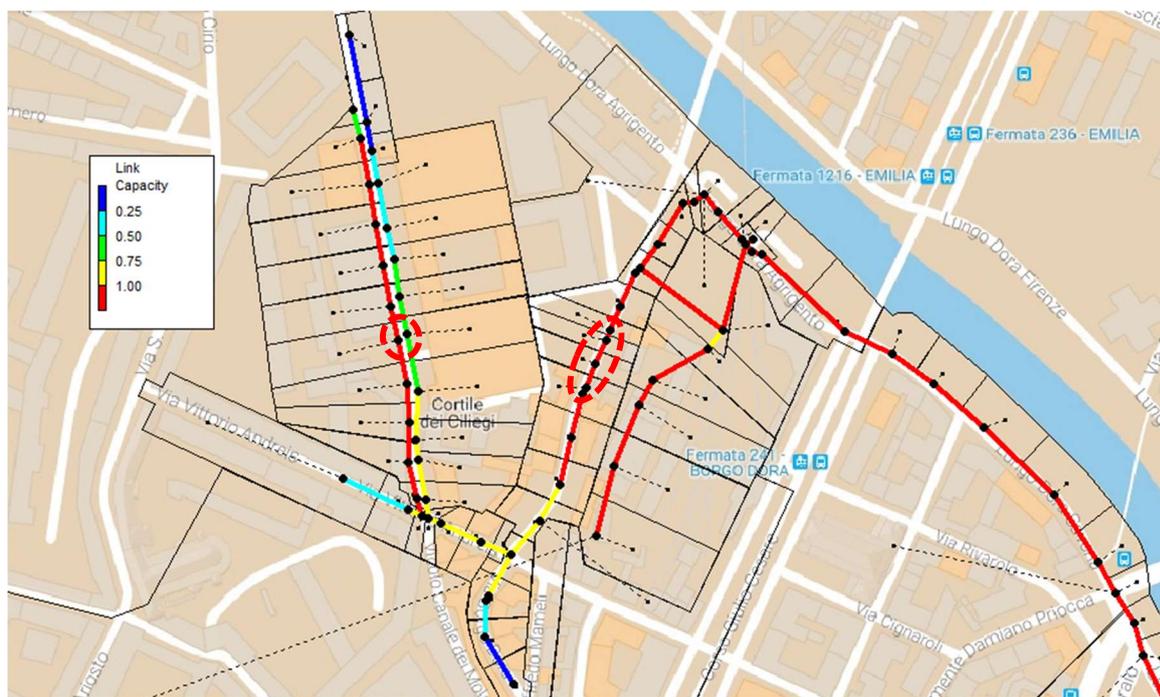
**Figura 4. 6:** Ietogrammi di progetto costanti adottati nell'analisi.

## 4.4 Stato attuale della rete

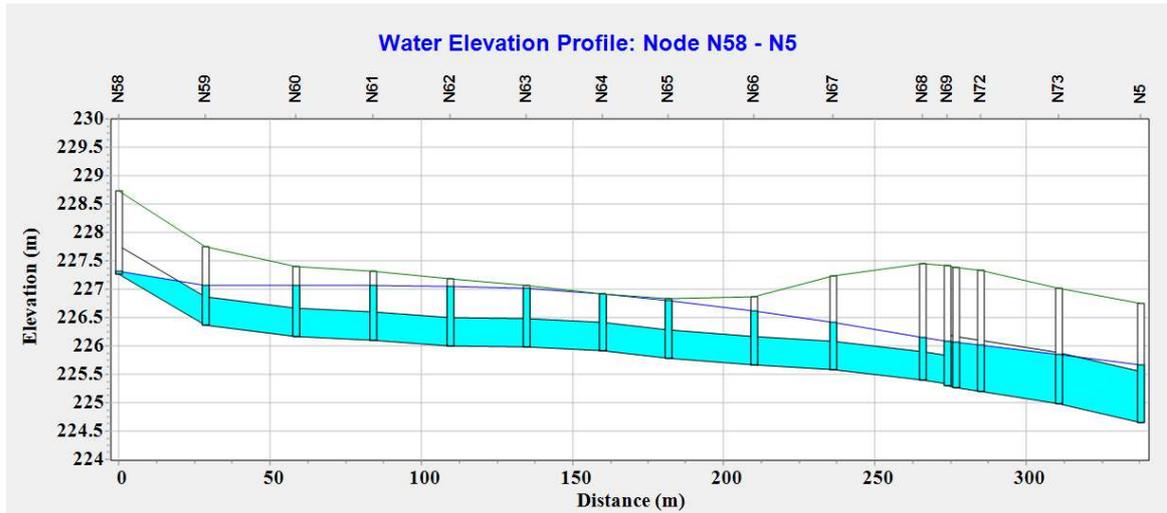
Per valutare le prestazioni della rete allo stato attuale, viene svolta una simulazione utilizzando la serie temporale riferita allo ietogramma costante con tempo di ritorno pari a 2 anni.

In questa situazione sono visibili già le prime problematiche all'interno della rete. In particolare, si evidenzia la presenza di numerosi collettori in pressione e si manifestano i primi allagamenti in Via Borgo Dora e in Via Andreis int. 18 lato dispari. Il condotto situato in Lungo Dora e il Canale delle Sabbionere non causano allagamenti, ma risultano essere prevalentemente in pressione.

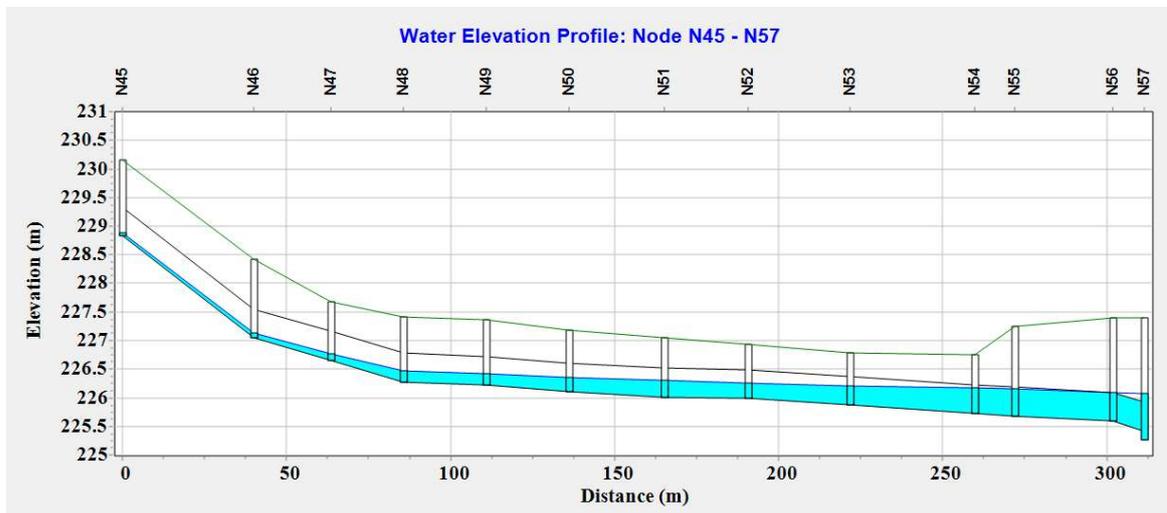
Le condizioni critiche della rete sono illustrate nella planimetria generale (figura 4.6), dove viene indicata la percentuale di riempimento dei collettori con diversi colori, il rosso identifica i collettori in pressione. I profili longitudinali mostrano più nel dettaglio l'andamento della linea piezometrica all'interno dei collettori, segnalando i punti in cui si verificano gli allagamenti. Di seguito vengono riportati i profili riguardanti i collettori situati in Via Andreis int.18 lato dispari (figura 4.7) e lato pari (figura 4.8), in Via Borgo Dora (figura 4.9), nel Canale delle Sabbionere (figura 4.10) e in Lungo Dora (figura 4.11).



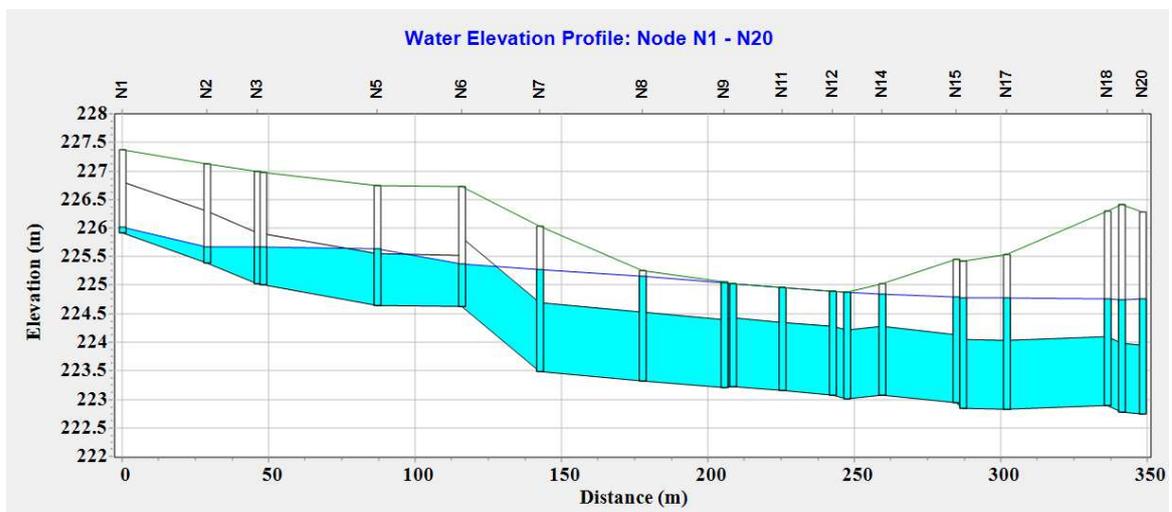
**Figura 4. 7:** Prestazioni della rete nello stato attuale per TR = 2 anni, in rosso sono contrassegnati i collettori in pressione, mentre le zone tratteggiate rappresentano gli allagamenti.



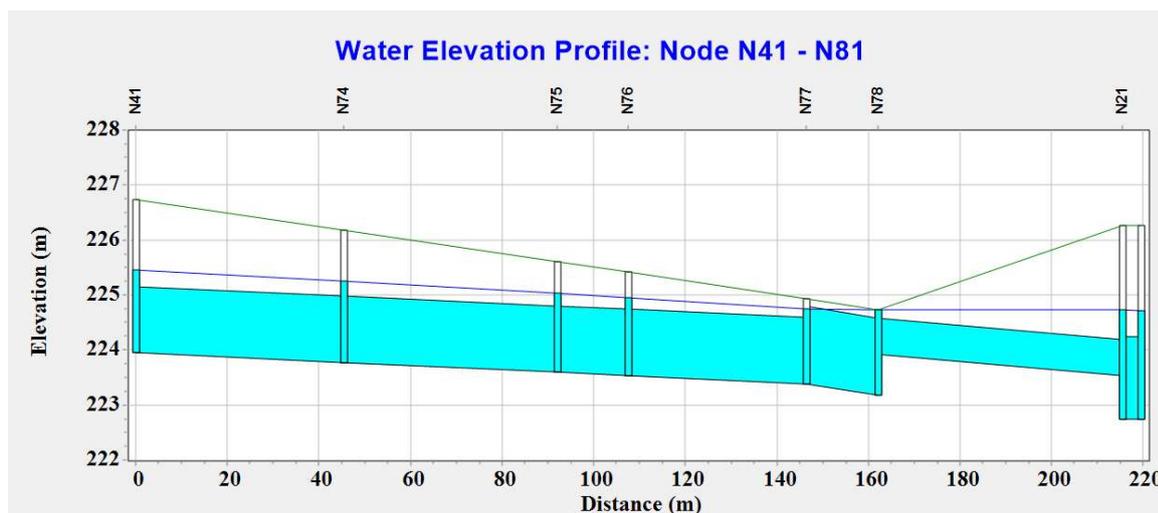
**Figura 4. 8:** Profilo longitudinale del collettore in Via Andreis int.18 lato dispari, TR=2 anni.



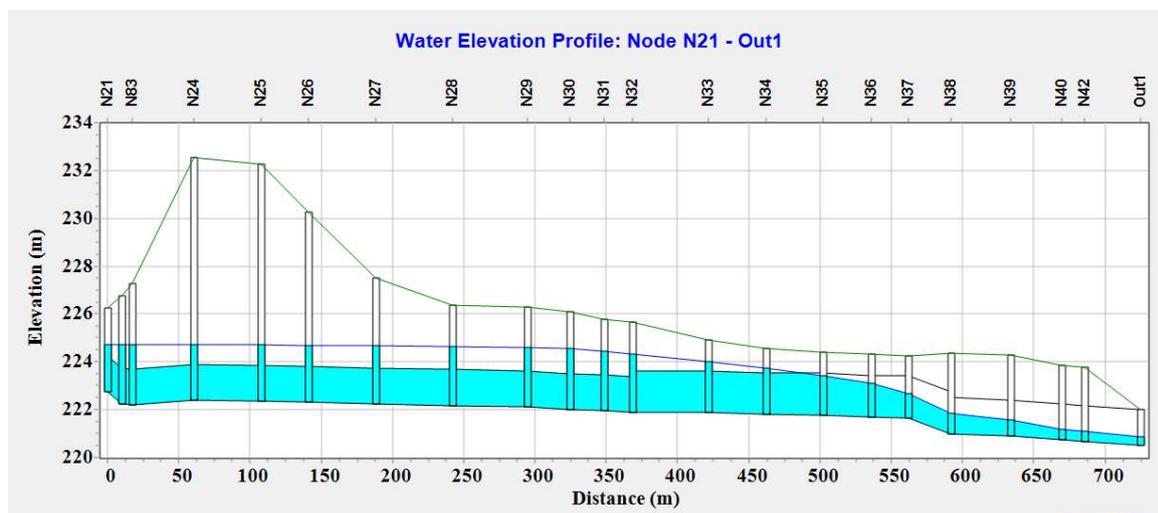
**Figura 4. 9:** Profilo longitudinale del collettore in Via Andreis int.18 lato pari, TR=2 anni.



**Figura 4. 10:** Profilo longitudinale del collettore in Via Borgo Dora, TR=2 anni.



**Figura 4. 11:** Profilo longitudinale del Canale delle Sabbionere, TR=2 anni.



**Figura 4. 12:** Profilo longitudinale del collettore in Lungo Dora, TR=2 anni.

I risultati ottenuti dalla simulazione evidenziano che per eventi potenzialmente frequenti, con tempi di ritorno di 2 anni, la maggior parte della rete di drenaggio analizzata è in pressione.

I punti più problematici sono essenzialmente tre. Il primo è in Via Andreis int.18 lato dispari, i cui allagamenti sono dovuti al sottodimensionamento dei collettori e all'effetto di rigurgito operato dal collettore in Via Andreis. Il secondo si trova nel condotto di Via Borgo Dora, nel nodo idraulico che lo collega al Canale delle Sabbionere. La crisi in questo punto della rete è causata dalla portata generata dall'estesa area drenata dal canale delle Sabbionere, infatti, tale quantitativo d'acqua manda in pressione i collettori, provocando allagamenti e la crisi a monte di tale zona. Il terzo punto è situato in Lungo Dora, nei pressi di Ponte Bologna, l'inserimento della portata proveniente dall'area drenata tra Corso Giulio Cesare e Via Priocca provoca le stesse problematiche rilevate in Via Borgo Dora.

Il cambiamento di sezione nel nodo N78 del Canale delle Sabbionere è dovuto alla presenza di detriti.

Le considerazioni sullo stato attuale evidenziano la necessità di intervenire, per migliorare le prestazioni della rete, e rappresentano il punto di partenza per valutare dove sia più opportuno posizionare le pratiche di drenaggio urbano sostenibile.

I profili longitudinali appena riportati, verranno confrontati con quelli del Capitolo 6, in cui sono state inserite le pratiche LID.

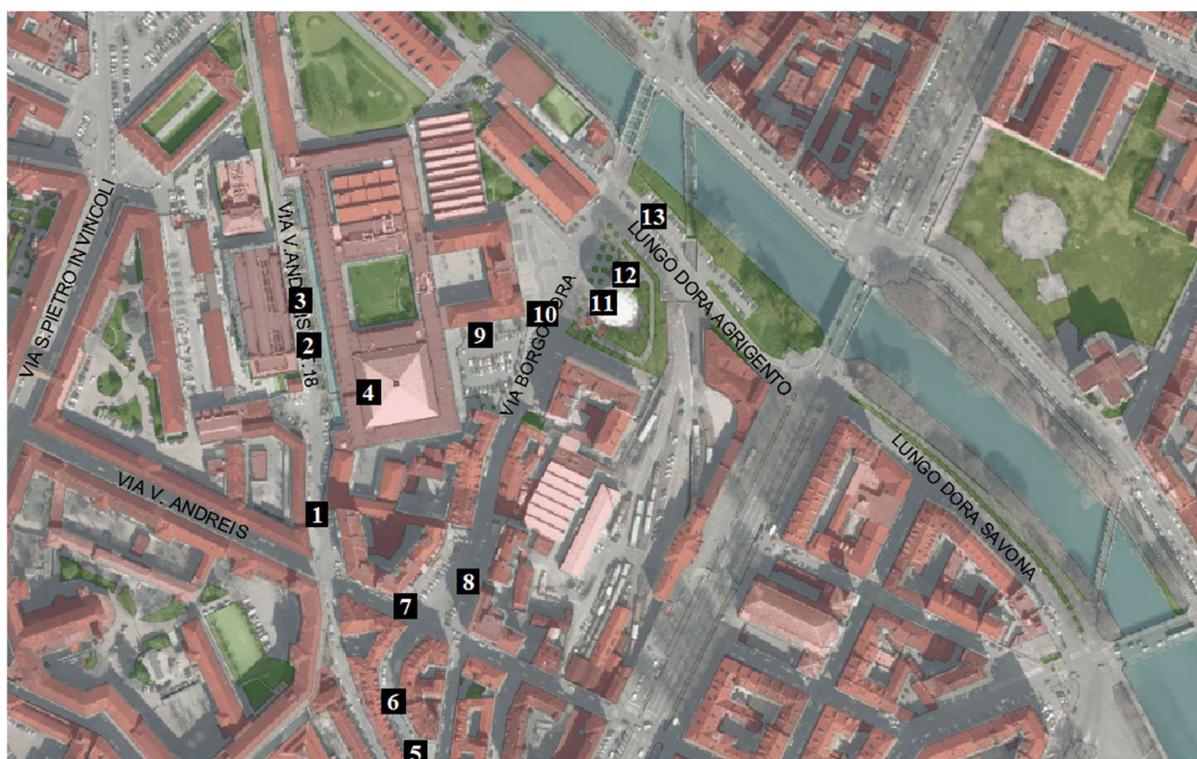


## Capitolo 5

### Sopralluogo e inserimento delle LID

Per stabilire la tipologia di LID da utilizzare e dove sia più opportuno posizionarle è stato di fondamentale importanza svolgere un sopralluogo nella zona di interesse. L'obiettivo è stato quello di collocare più elementi drenanti possibili, senza stravolgere l'attuale assetto della zona, in modo che non si debbano fare eccessive modifiche sulla strada e sugli edifici.

La mappa riportata in figura 5.1 mostra il punto in cui sono state scattate le foto presenti in questo capitolo, utilizzate per giustificare l'inserimento di determinate LID in zona Borgo Dora.



**Figura 5. 1:** Mappa dell'area analizzata per l'inserimento delle LID, i numeri corrispondono alle foto riportate nel capitolo.

## 5.1 Sopralluogo e considerazioni Via Andreis interno 18

Via Andreis interno 18 è una strada lunga quasi 300 metri a traffico limitato, utilizzata per il passaggio pedonale, come parcheggio per le sole auto autorizzate e, nei giorni festivi, diventa una zona riservata al mercato. Per questo motivo è risultata idonea al posizionamento della pavimentazione permeabile.

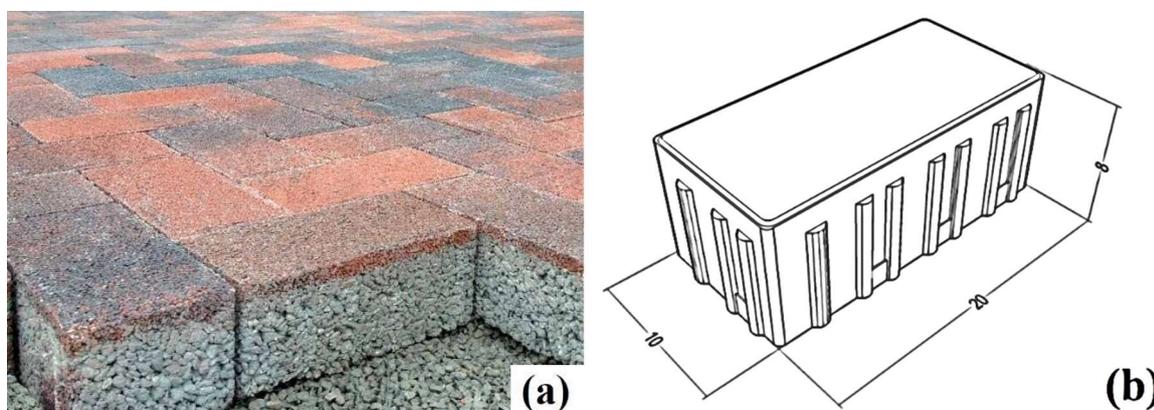
In figura 5.2 vengono mostrate due parti della via, quella iniziale (foto 1) e quella all'altezza del civico 25 (foto 2). Dal sopralluogo è stato evidente come, per tutta la lunghezza della strada, sia possibile inserire una pavimentazione permeabile. A lato della strada, dalla parte dei numeri civici pari, si è scelto di sostituire un tratto riservato ai parcheggi con delle aree di bioretensione, in modo da dare uno spazio verde e più piacevole alla via.

La pavimentazione permeabile adottata è costituita da blocchi di cemento come quelli in figura 5.3, poiché sono adatti ad un traffico medio (questa tipologia di blocchi viene utilizzata per tutte le pavimentazioni drenanti inserite nel progetto).

Sia le pavimentazioni permeabili che le aree di bioretensione trattano l'acqua proveniente dai tetti, che si trovano immediatamente sopra la zona di drenaggio sostenibile.



**Figura 5. 2:** Foto 1) Ingresso di Via Andreis int.18. Foto 2) Tratto all'altezza del civico 25 di Via Andreis int. 18.

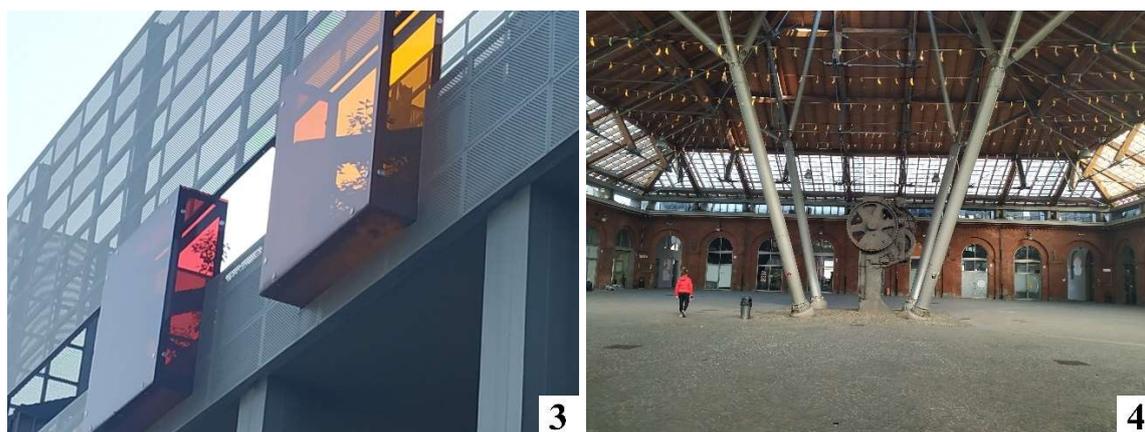


**Figura 5. 3:** a) Tipologia di blocchi drenanti utilizzati per la simulazione delle pavimentazioni permeabili. b) Dimensioni dei blocchi drenanti utilizzati nella simulazione.

In Via Andreis int.18 sono stati individuati due edifici in cui è possibile inserire dei tetti verdi: la Scuola per Artigiani Restauratori e il Cortile del Maglio. Queste due strutture sono di utilizzo pubblico e presentano una copertura in materiale metallico, che risulta più agevole nella sistemazione dei tetti verdi, rispetto a una normale copertura in materiale laterizio, che in tal caso deve essere completamente sostituita. Nella simulazione si è preferito inserire dei tetti verdi estensivi, in quanto esercitano un basso carico sulla struttura e non richiedono manutenzione.

Nella foto 2, l'edificio a sinistra è la Scuola per Artigiani Restauratori, mentre la foto 3 mostra più da vicino una parte del tetto, in cui si intravede della vegetazione.

Il Cortile del Maglio (foto 4) è costituito da una piazza centrale, definita da una superficie quadrata di quaranta metri per quaranta. Al centro del cortile coperto si trova il grande Maglio. La struttura è sede dell'Associazione Cortile del Maglio, la quale si dedica all'organizzazione di eventi socioculturali, per promuovere e riqualificare il quartiere Borgo Dora [32].



**Figura 5. 4:** Foto 3) Particolare del tetto della Scuola per Artigiani Restauratori.  
Foto 4) Interno del Cortile del Maglio.

## 5.2 Sopralluogo e considerazioni Via Borgo Dora

Via Borgo Dora è la sede principale del mercato del Balon del sabato, ma, durante la settimana, resta comunque una via molto trafficata, sia da auto che da veicoli più pesanti. Per questo, non è possibile considerare tutta la strada costituita da pavimentazione permeabile, come nel caso di Via Andreis interno 18.

Nel tratto iniziale, all'altezza del civico 10 (foto 5), viene inserita un'area di bioretensione, che tratta l'acqua proveniente dal tetto dell'edificio più vicino. Dato che i problemi si

riscontrano più a valle, dopo il nodo idraulico numero 5, non è necessario sovraccaricare questa parte iniziale della via (foto 6) di sistemi di drenaggio sostenibile.



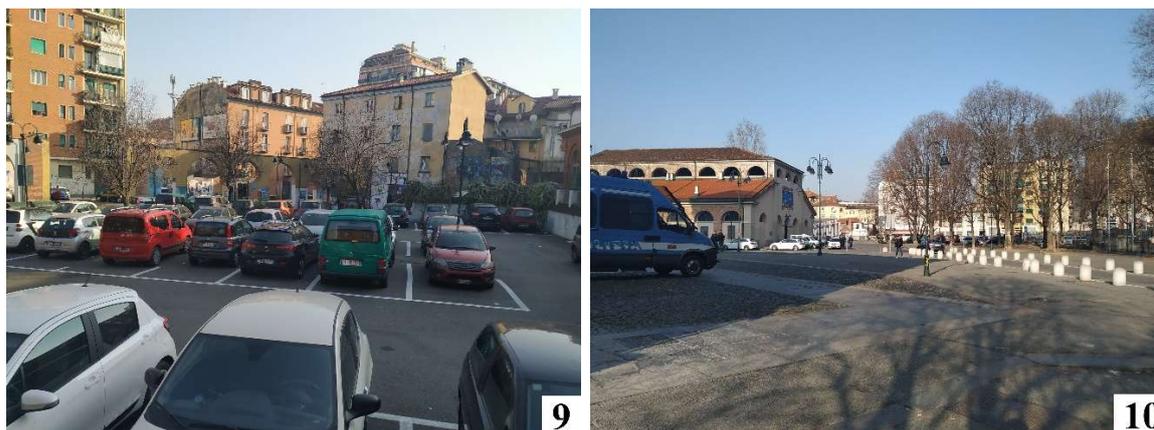
**Figura 5. 5:** Foto 5) Inizio di Via Borgo Dora in cui viene ipotizzata la presenza di un sistema di bioretensione. Foto 6) Via Borgo Dora a livello del civico 14.

Più avanti, nel punto di Via Borgo Dora ad angolo con Via Andreis, si ha un ampio spazio adibito a parcheggio e ad area pedonale (foto 7, 8). In questa zona si è deciso di introdurre una pavimentazione permeabile alternata da aree di bioretensione. I sistemi di bioretensione sono posizionati nelle superfici non destinate al parcheggio e in cui sono già presenti delle piccole aiuole nello stato attuale.



**Figura 5. 6:** Foto 7 e 8) Via Borgo Dora ad angolo con Via Andreis.

Quasi alla fine di Via Borgo Dora, nei pressi della Scuola Holden, si trova un ampio parcheggio (foto 9). Nel modello sia il parcheggio che l'ampio piazzale d'ingresso della Scuola (foto10) vengono considerati come costituiti da pavimentazione permeabile.



**Figura 5. 7:** Foto 9) Parcheggio di Via Borgo Dora nei pressi della Scuola Holden e del secondo ingresso del Cortile del Maglio. Foto 10) Piazzale d'ingresso della Scuola Holden.

Inoltre, dalle immagini fornite dal satellite e dal sito della Scuola Holden, è possibile notare che all'interno della struttura vi è un cortile interno, che nella simulazione viene trasformato in un giardino costituito da sistemi di bioretensione. Quest'ultime trattano direttamente l'acqua proveniente dal tetto della Scuola.

In Piazza Borgo Dora 1, all'interno del Giardino Cardinal Pellegrino, ha sede l'aerostato HiFlyer. La superficie dedicata allo stallo dell'aeromobile e alla biglietteria (foto 11) è considerata ricoperta da pavimentazione permeabile, il resto dell'area (foto 12) da bioretenzioni.



**Figura 5. 8:** Foto 11 e 12) Giardino Cardinal Pellegrino sede dell'aerostato HiFlyer.

### 5.3 Sopralluogo e considerazioni Lungo Dora

In Lungo Dora Agrigento numero 21 si trova l'ingresso della vecchia stazione Torino Porta Milano, che ha cessato di svolgere un servizio pubblico nel 1987. Adesso la zona ospita il Museo Ferroviario Piemontese e l'Officina Restauri [33]. Quest'area nel modello viene ipotizzata rivestita da pavimentazione drenante.

In Lungo Dora Agrigento e Lungo Dora Savona, fino all'incrocio con Ponte Bologna, sono presenti degli ampi marciapiedi e piste ciclabili (foto 13). Nella simulazione una parte di questi sono sostituiti da aree di bioretensione.



**Figura 5. 9:** Foto 13) Area pedonale e pista ciclabile in Lungo Dora Agrigento in prossimità del Ponte Carpanini.

### 5.4 Inserimento delle LID in SWMM

Partendo dal modello SWMM fornito dallo studio svolto dal Prof. Fulvio Boano, dall'Ing. Stefano Losero e dal Prof. Luca Ridolfi per la SMAT, per inserire le opere di drenaggio urbano sostenibile, si è deciso di suddividere ulteriormente i sottobacini esistenti, in modo da avere delle aree riservate interamente a una sola pratica LID. Quindi, l'approccio scelto per introdurre tali sistemi è il secondo proposto dallo *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Operando in questa maniera, si ha un maggiore controllo del modello nel valutare il comportamento delle LID. Inoltre, è possibile far funzionare i sistemi in serie e convogliare le portate provenienti dai sottobacini a monte, per essere trattate dai sistemi di drenaggio sostenibile più a valle.

Per fare in modo che l'acqua proveniente dai tetti venga convogliata in una pratica LID, il punto di uscita della portata prodotta dall'area da trattare viene impostato pari al sottobacino dedicato alla LID.

Quando l'intero subcatchment viene destinato a un sistema di drenaggio sostenibile, i suoi valori standard (come impermeabilità, scabrezza, pendenza etc.) vengono ignorati e si tiene conto solo delle caratteristiche della particolare pratica definita nel "LID Control Editor".

La prima operazione svolta è stata quella di frazionare alcuni sottobacini, passando da un modello iniziale di zona Borgo Dora con 84 aree ad uno con 126. Si è cercato di alterare il meno possibile il nuovo sistema di drenaggio rispetto a quello iniziale.

Per verificare che non vi siano errori e che il nuovo modello non si discosti troppo da quello iniziale, è stata svolta una simulazione per eventi con TR = 2 anni e sono stati confrontati i profili longitudinali e lo "Status Report" dei due modelli, constatando che i risultati ottenuti combaciavano. Il raffronto tra i due "Status Report" viene mostrato in Appendice A, alla fine della presente tesi.

In seguito, compilando il "LID Editor" di SWMM, sono state assegnate le LID ai sottobacini. Le caratteristiche principali delle aree dedicate alle tecniche di drenaggio urbano sostenibile (tipologia di LID, area, larghezza equivalente e percentuale di saturazione iniziale) vengono riportati in Appendice B.

Complessivamente le LID ipotizzate in Zona Borgo Dora occupano 3,5 ettari di superficie, che corrispondono a circa il 4% dell'area totale drenata dai collettori.

Di seguito viene specificata l'estensione delle LID inserite.

In Via Andreis interno 18:

- la pavimentazione permeabile ricopre un'area di 2792 m<sup>2</sup>;
- i due tetti verdi hanno un'estensione totale di 6257 m<sup>2</sup>;
- le aree di bioretensione occupano una superficie di 5900 m<sup>2</sup>.

In Via Borgo Dora:

- la bioretensione del tratto iniziale ha un'area di 177 m<sup>2</sup>;
- all'altezza del civico 33, la pavimentazione permeabile e le aree di bioretensione occupano rispettivamente una superficie totale di 1022 e 710 m<sup>2</sup>;
- il parcheggio con pavimentazione drenante ricopre una superficie di 2544 m<sup>2</sup>;
- la pavimentazione permeabile del piazzale d'ingresso della Scuola Holden riveste una zona di 1054 m<sup>2</sup>;
- il cortile della Scuola formato da aree di bioretensione ha un'estensione di 841 m<sup>2</sup>;
- il Giardino Cardinal Pellegrino è costituito per 1020 m<sup>2</sup> da pavimentazione drenante e per 1220 m<sup>2</sup> da aree di bioretensione.

In Lungo Dora:

- la superficie destinata ai sistemi di bioretensione è di 9584 m<sup>2</sup>;
- la pavimentazione permeabile del Museo Ferroviario Piemontese ha un'ampiezza di 5407 m<sup>2</sup>.

In figura 5.10 viene mostrata nella mappa l'area occupata dalle LID in rosso.



**Figura 5. 10:** Mappa di zona Borgo Dora che localizza le diverse LID (in rosso).

# Capitolo 6

## Risultati e commenti – Modello con LID

Allo stato attuale, la rete in Zona Borgo Dora si trova in una situazione critica. Per eventi con basso tempo di ritorno (2 anni) e quindi abbastanza frequenti, si manifestano allagamenti e collettori in pressione. Più nel dettaglio gli allagamenti si registrano in Via Andreis int.18 e in Via Borgo Dora.

Allo scopo di mitigare i problemi, si ipotizza di inserire delle opere di drenaggio urbano sostenibile (nei sottobacini visti nel Capitolo 5), senza modificare nessun altro punto della rete. Nel seguente capitolo verrà analizzato lo stato dei collettori nel caso in cui siano presenti delle LID per tempi di ritorno pari a 2 anni.

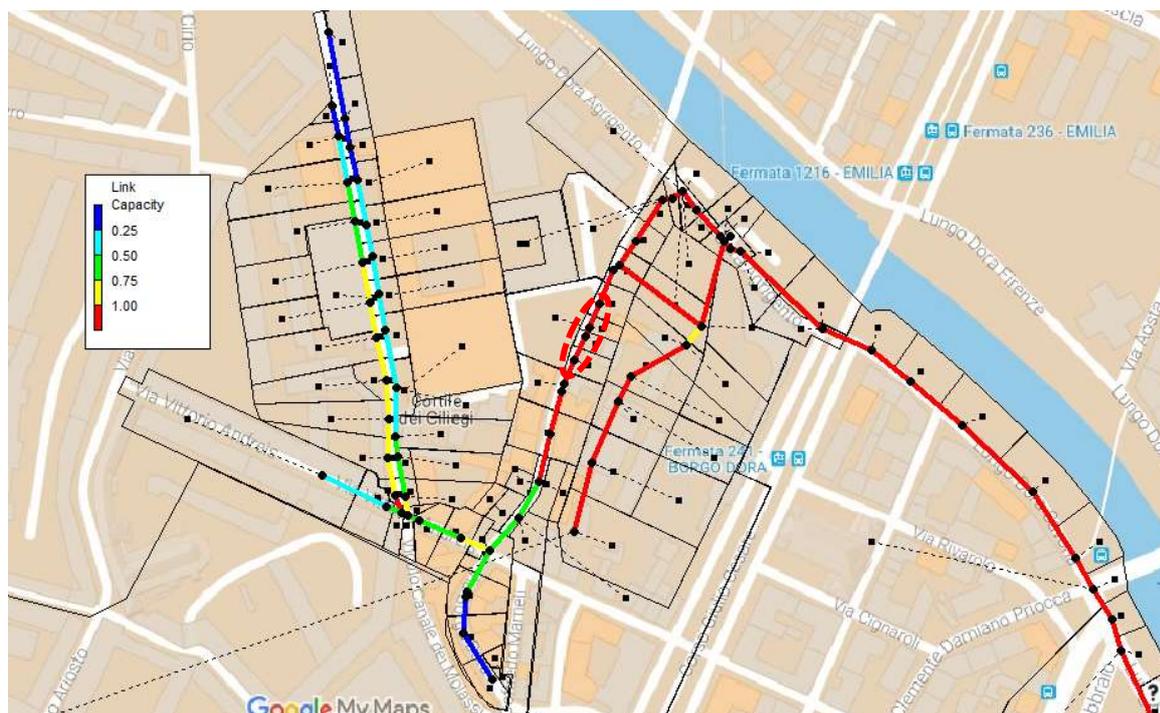
### 6.1 Simulazione per TR = 2 anni

Inserendo dei sistemi di drenaggio sostenibili nei punti visti nel Capitolo 5, si riscontrano notevoli miglioramenti in Via Andreis interno 18 (Figura 6.1).

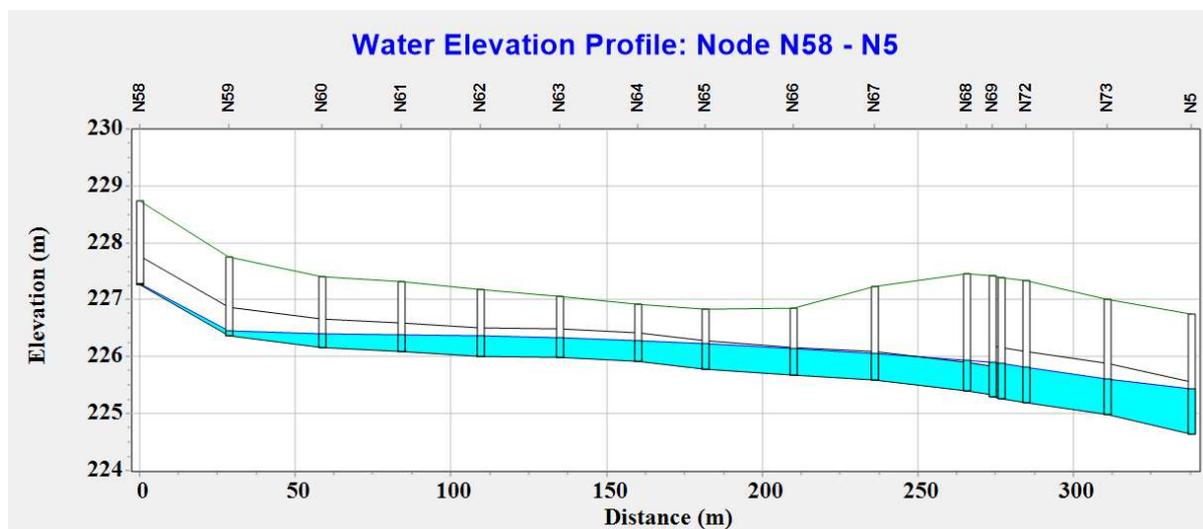
In particolare, nel lato dispari, non si verificano più allagamenti e rimane in pressione solo un brevissimo tratto finale (figura 6.2). Il profilo longitudinale del lato pari (figura 6.3) mostra che la quantità d'acqua che si riversa nel collettore è minore rispetto a quella riportata nella situazione attuale in figura 4.8.

Per quanto riguarda Via Borgo Dora, non vi sono rimarcabili miglioramenti e il problema degli allagamenti non viene risolto. L'intervallo di tempo in cui l'acqua arriva al piano stradale è minore, ma la configurazione del profilo longitudinale rimane uguale al caso senza le LID (Figura 4.9).

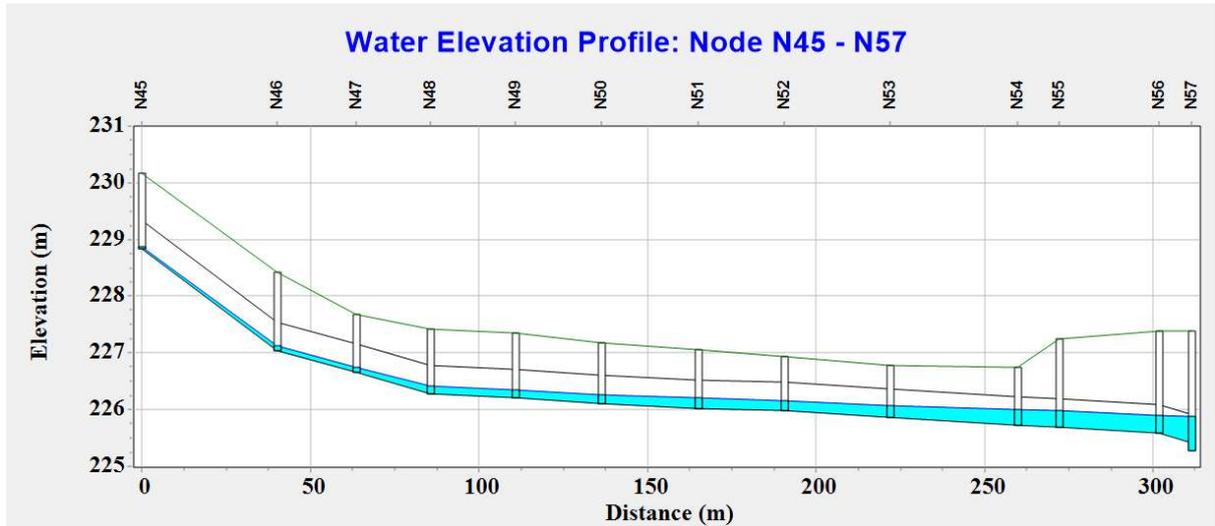
Stesse considerazioni valgono per il Canale delle Sabbionere e per il collettore in Lungo Dora, nonostante la presenza delle LID non si riesce ad evitare che i collettori entrino in pressione e non vi sono notevoli variazioni rispetto allo stato iniziale.



**Figura 6. 1:** Prestazioni della rete in presenza di LID per TR = 2 anni, in rosso sono contrassegnati i collettori in pressione, le zone tratteggiate rappresentano gli allagamenti.



**Figura 6. 2:** Profilo longitudinale collettore Via Andreis int.18 (lato dispari) in presenza di LID, TR = 2 anni.



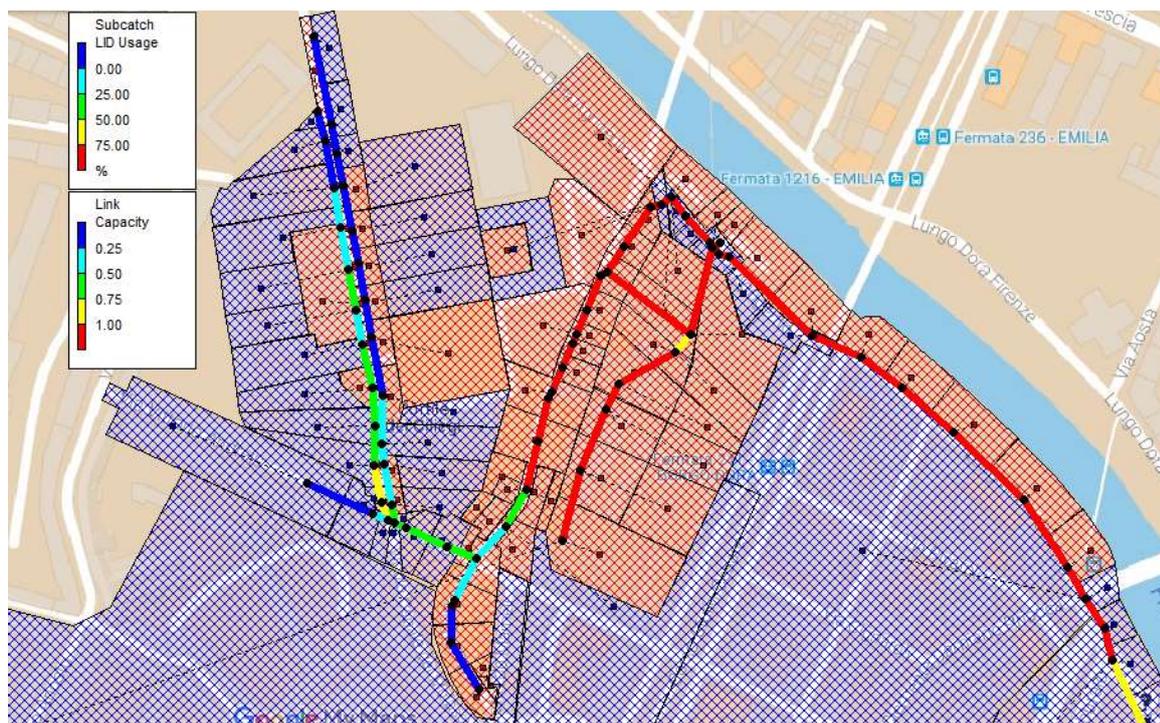
**Figura 6. 3:** Profilo longitudinale collettore Via Andreis int.18 (lato pari) in presenza di LID, TR = 2 anni.

## 6.2 Simulazione ipotizzando una maggiore presenza di LID per TR = 2 anni

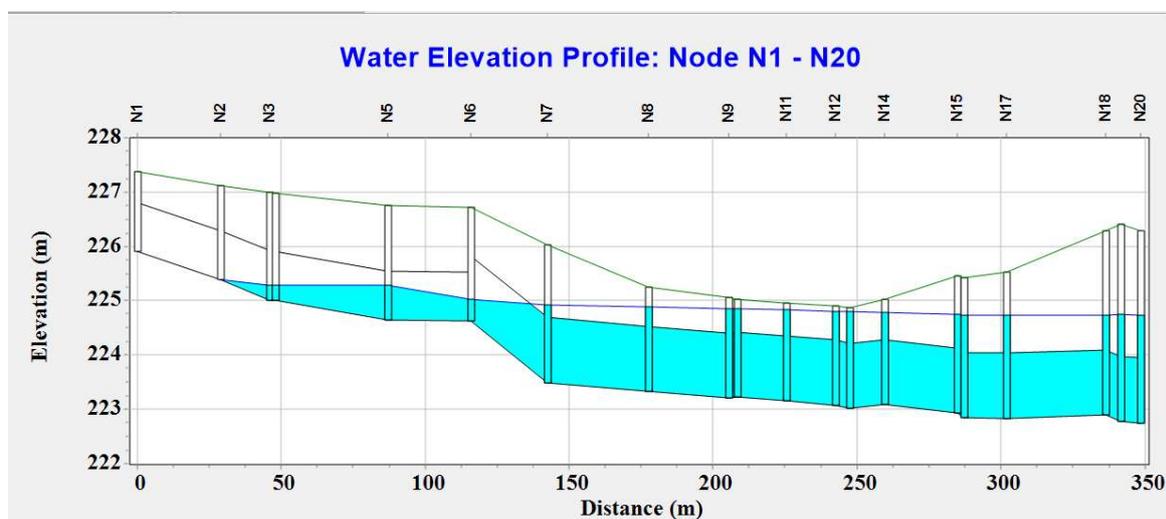
Attraverso l'introduzione delle LID viene risolta la crisi in Via Andreis interno 18, ma nel resto della rete permangono le problematiche. Per valutare se in qualche modo sia possibile risolvere tale situazione con il solo utilizzo delle LID, si considera un caso limite (non realizzabile nella realtà). Si ipotizza che tutti i sottobacini di via Borgo Dora e del Canale delle Sabbionere siano interamente costituiti da sistemi di drenaggio urbano sostenibile.

Nel modello utilizzato per questa simulazione, si hanno le stesse LID viste nel Capitolo 5 e ne vengono aggiunte delle nuove, come riportato nella mappa in figura 6.4. Viene preso in considerazione sia il caso in cui le LID aggiuntive siano tutte pavimentazioni permeabili che aree di bioretensione. Entrambe le situazioni danno gli stessi risultati.

Nonostante la massiva concentrazione di nuove LID, la figura 6.4 evidenzia come le problematiche della rete non vengano risolte in modo soddisfacente. In Via Borgo Dora non si verificano allagamenti, ma i collettori restano ugualmente in pressione (figura 6.5). In Lungo Dora e nel Canale delle Sabbionere la situazione rimane pressoché uguale a quella iniziale.



**Figura 6. 4:** Mappa che evidenzia le aree in cui sono presenti le LID (in rosso) e mostra le prestazioni della rete per TR = 2 anni (in rosso sono contrassegnati i collettori in pressione)



**Figura 6. 5:** Profilo longitudinale del collettore in Via Borgo Dora in presenza di sistemi LID che ricoprono tutti i sottobacini connessi a tale collettore, TR=2 anni.

### 6.3 Commenti

Dalle simulazioni per tempi di ritorno pari a 2 anni, riportate in questo capitolo, si può affermare che l'uso delle LID è efficace per attenuare i problemi in Via Andreis int.18, in quanto non si verificano più allagamenti. Nelle altre zone, nonostante aumenti il tasso di infiltrazione e venga offerto un volume di stoccaggio grazie alle LID, lo stato di crisi permane. Questo è causato soprattutto dall'apporto di portate elevate, provenienti dalle aree estese a monte dei collettori analizzati, che sono preponderanti rispetto a quelle prodotte dai sottobacini più a valle, in cui sono state inserite le tecniche LID.

Gli allagamenti in Via Borgo Dora vengono causati dal collegamento con il Canale delle Sabbionere. Quest'ultimo drena complessivamente un'area di 22.3 ettari, solamente 2.3 ettari rappresentano le aree in cui sono state inserite le LID, mentre la restante parte di 20 ettari è compresa tra Corso Valdocco e Via della Consolata. Per quest'area non si hanno attualmente sufficienti informazioni sulla posizione dei collettori e viene semplicemente modellata come una macroarea, che riversa la sua portata all'inizio del Canale delle Sabbionere. Stesse considerazioni valgono per il collettore in Lungo Dora, che riceve le portate provenienti dalla macroarea localizzata tra Corso Giulio Cesare e Via Priocca.

Per tutte queste ragioni, non è possibile risolvere lo stato di crisi con il semplice inserimento di sistemi di drenaggio sostenibile, sono necessari altri interventi.







**Figura 7. 2:** Scarico relativo al Canale delle Sabbionere in prossimità di Ponte Mosca.

Nel presente capitolo verranno confrontati i risultati ottenuti grazie all'apertura degli scarichi con quelli ricavati dall'apertura degli scarichi in abbinamento alle pratiche LID, per tempi di ritorno pari a 2 e a 5 anni.

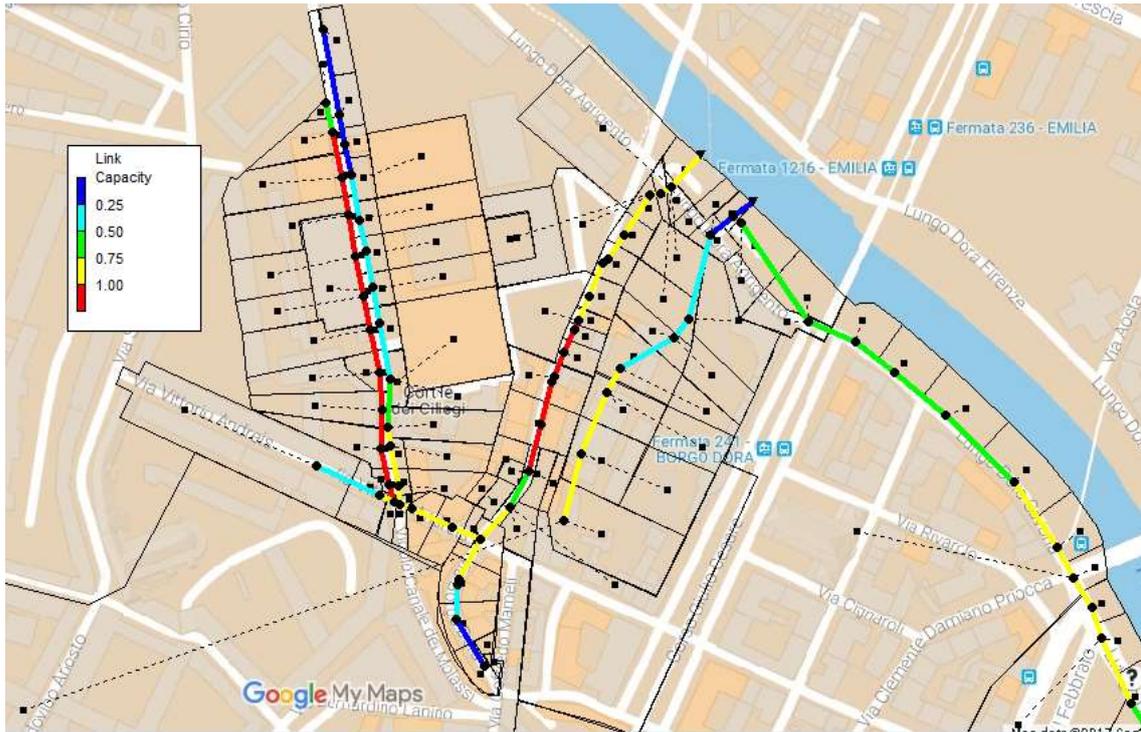
## **7.1 Simulazione con apertura scarichi TR=2 anni**

L'apertura degli scarichi sortisce un effetto positivo, in quanto non si verificano più allagamenti, ma rimane il problema dei collettori in pressione in Via Andreis interno 18 (lato dispari) e in Via Borgo Dora (figura 7.3).

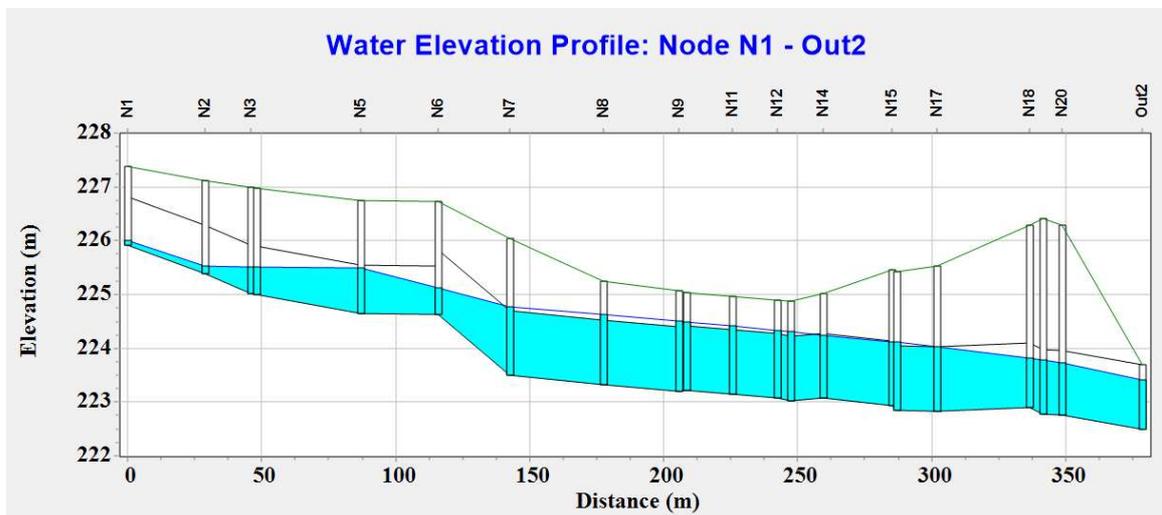
In particolare, nonostante si abbia un abbassamento della linea piezometrica in Via Borgo Dora (figura 7.4), non si riesce ad evitare l'effetto rigurgito sui due collettori in Via Andreis interno 18. Come mostra la figura 7.5, la situazione più critica si ha sempre nel collettore lato dispari della via.

Il Canale delle Sabbionere (figura 7.6) non presenta particolari criticità, solamente il tratto iniziale risulta essere quasi in pressione, poiché in tale punto il collettore è sottodimensionato.

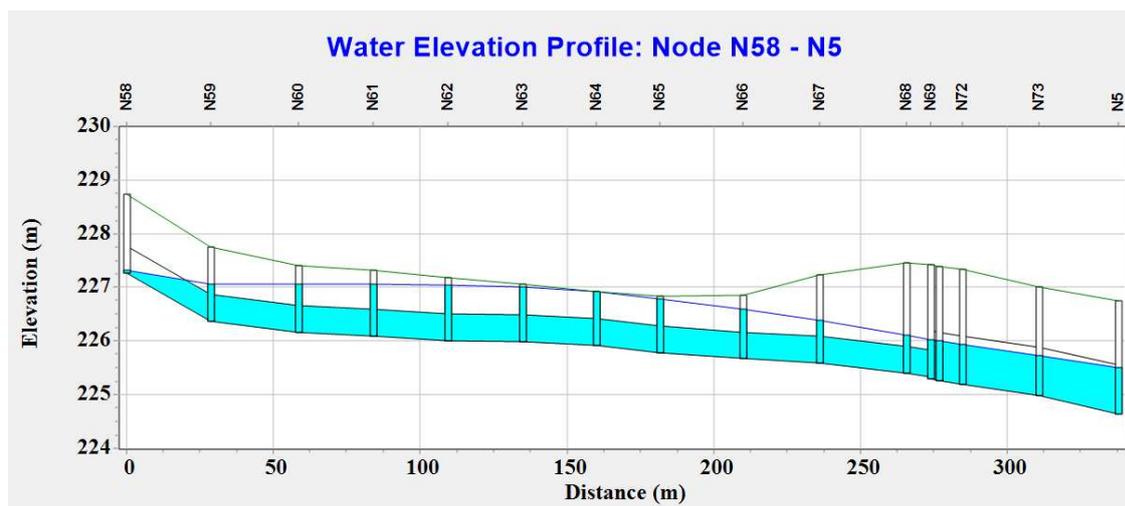
Anche il condotto in Lungo Dora (figura 7.7) non manifesta rimarcabili problematiche, dimostrando che la portata proveniente dall'area drenata tra Corso Giulio Cesare e Via Priocca non è la causa principale dell'aumento di livello.



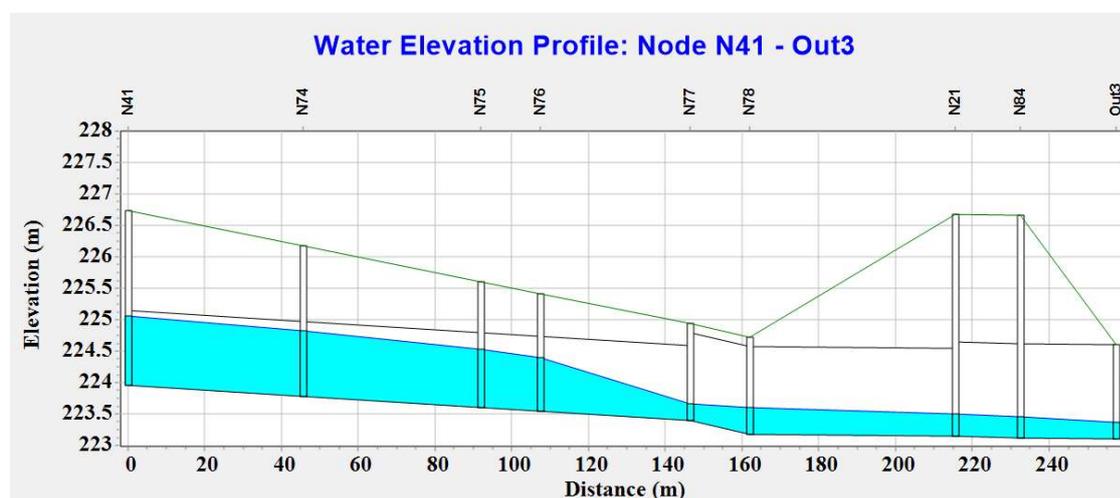
**Figura 7. 3:** Prestazioni della rete con apertura scarichi per TR = 2 anni, in rosso sono rappresentati i collettori in pressione



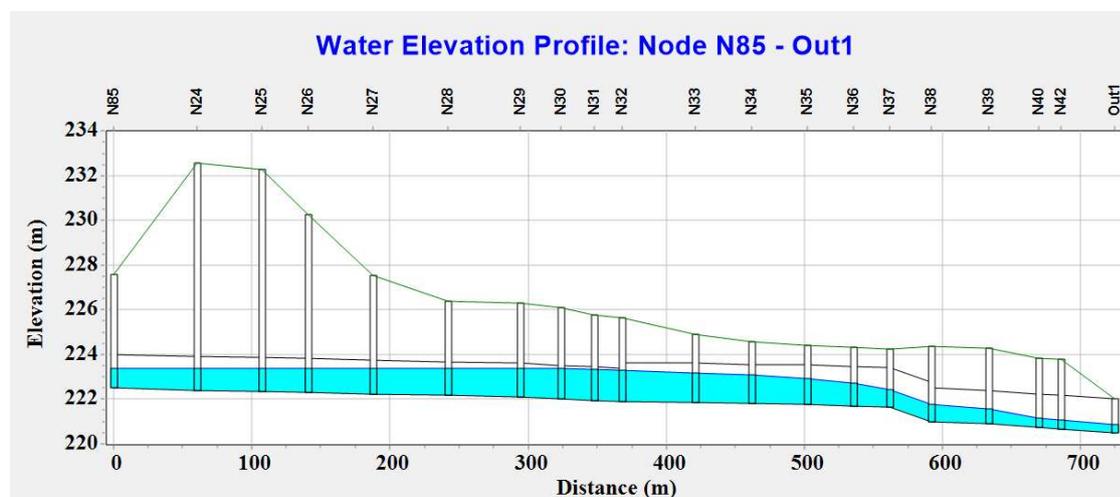
**Figura 7. 4:** Profilo longitudinale del collettore in Via Borgo Dora in seguito all'apertura degli scarichi per TR = 2 anni.



**Figura 7. 5:** Profilo longitudinale del collettore in Via Andreis int.18 (lato dispari) con apertura scarichi per TR = 2 anni.



**Figura 7. 6:** Profilo longitudinale del Canale delle Sabbionere in seguito all'apertura degli scarichi per TR = 2 anni.



**Figura 7. 7:** Profilo longitudinale del collettore in Lungo Dora con apertura scarichi per TR = 2 anni.

## 7.2 Simulazione con LID e apertura scarichi TR=2 anni

L'inserimento delle LID in concomitanza con l'apertura degli scarichi ha un ulteriore effetto benefico di alleggerimento dei collettori, come illustrato in figura 7.8.

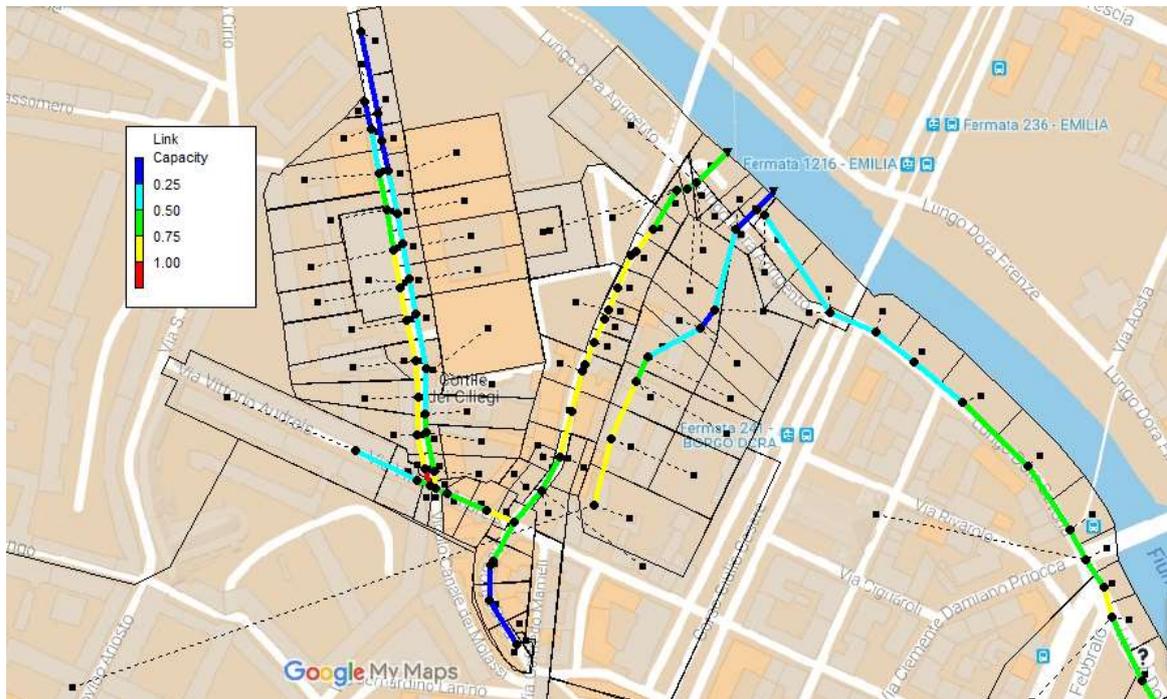
In Via Andreis int.18 lato dispari (figura 7.9), rispetto al caso senza LID, non si hanno più collettori in pressione, ad eccezione di un piccolo tratto finale tra il nodo N68 e N69 (presente anche nella simulazione senza apertura degli scarichi trattata nel Capitolo 6).

Le pavimentazioni permeabili e le aree di bioretensione sono efficaci per evitare che il collettore in Via Borgo Dora entri in pressione (figura 7.10).

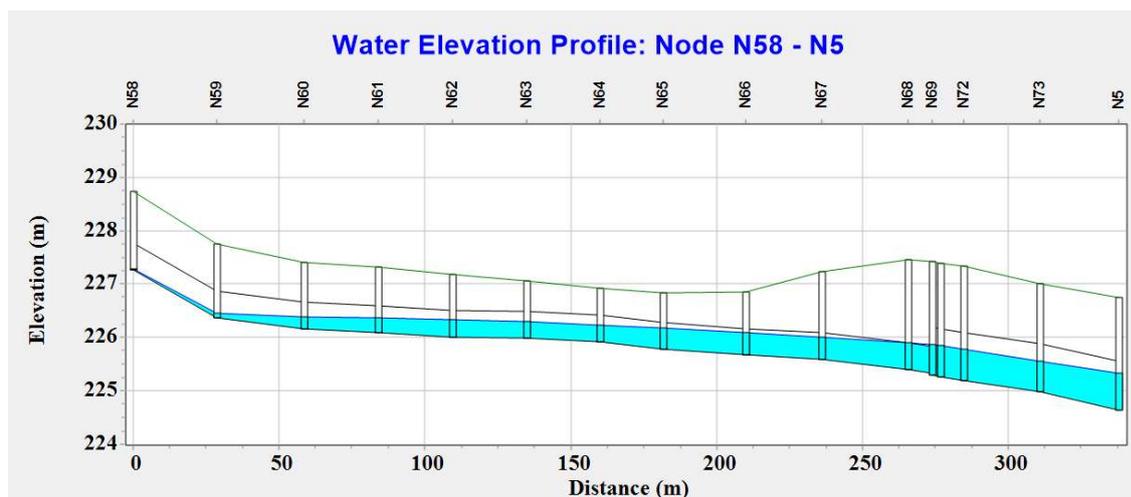
Per quanto riguarda il Canale delle Sabbionere, la pavimentazione drenante non provoca nessun rimarcabile miglioramento, proprio perché, ancora una volta, è preponderante la portata proveniente dalla macroarea a monte.

In Lungo Dora (figura 7.11), per mezzo delle aree di bioretensione si ha un abbassamento del livello all'interno del collettore, rispetto al caso senza.

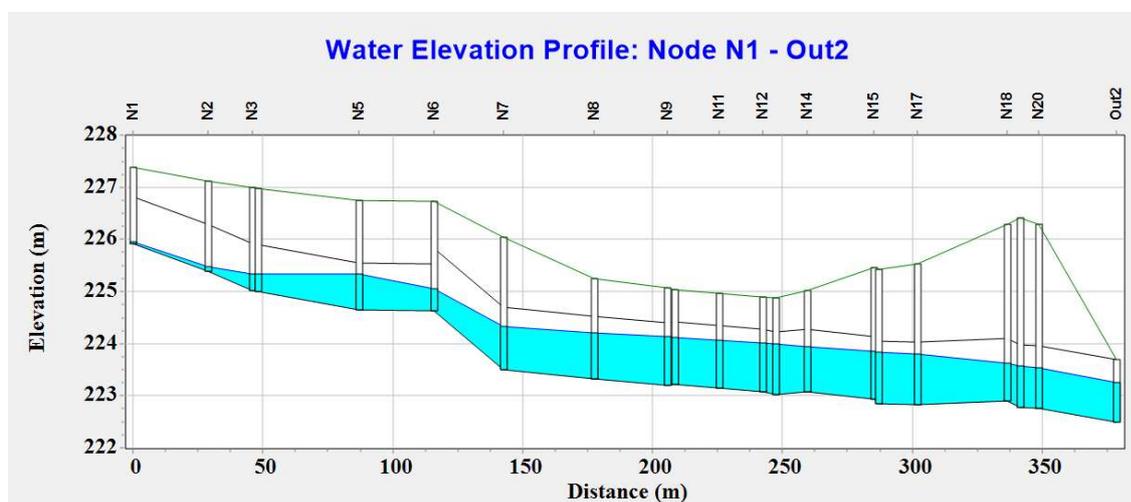
Per vedere degli effetti significativi con l'inserimento delle LID in Via Andreis int.18 lato pari, si deve effettuare una simulazione per tempi di ritorno di 5 anni.



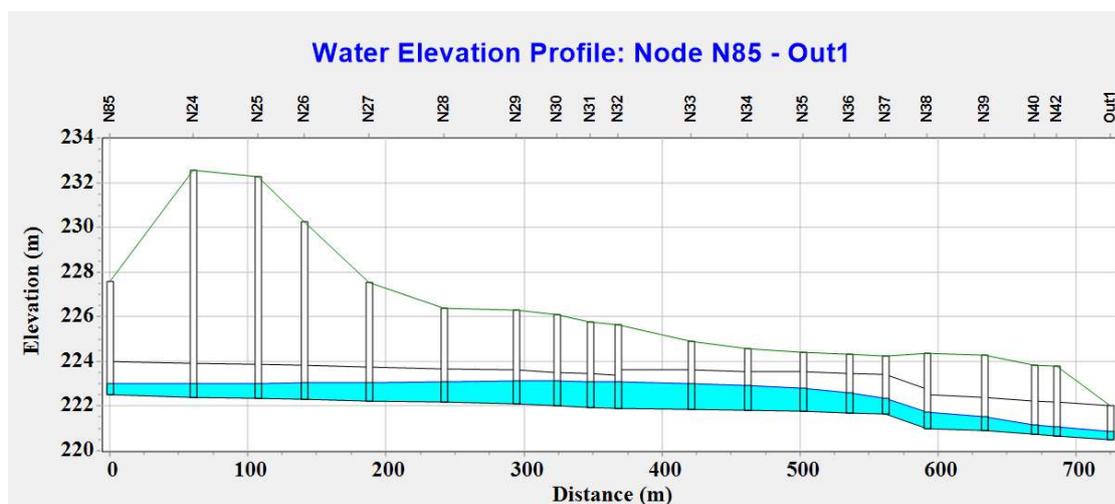
**Figura 7. 8:** Stato della rete con apertura scarichi e pratiche LID per TR = 2 anni.



**Figura 7. 9:** Profilo longitudinale del collettore in Via Andreis int.18 (lato dispari) con apertura scarichi e LID per TR = 2 anni.



**Figura 7. 10:** Profilo longitudinale del collettore in Via Borgo Dora con apertura scarichi e LID per TR = 2 anni.



**Figura 7. 11:** Profilo longitudinale del collettore in Lungo Dora con apertura scarichi e LID per TR = 2 anni.

### 7.3 Simulazione con apertura scarichi TR=5 anni

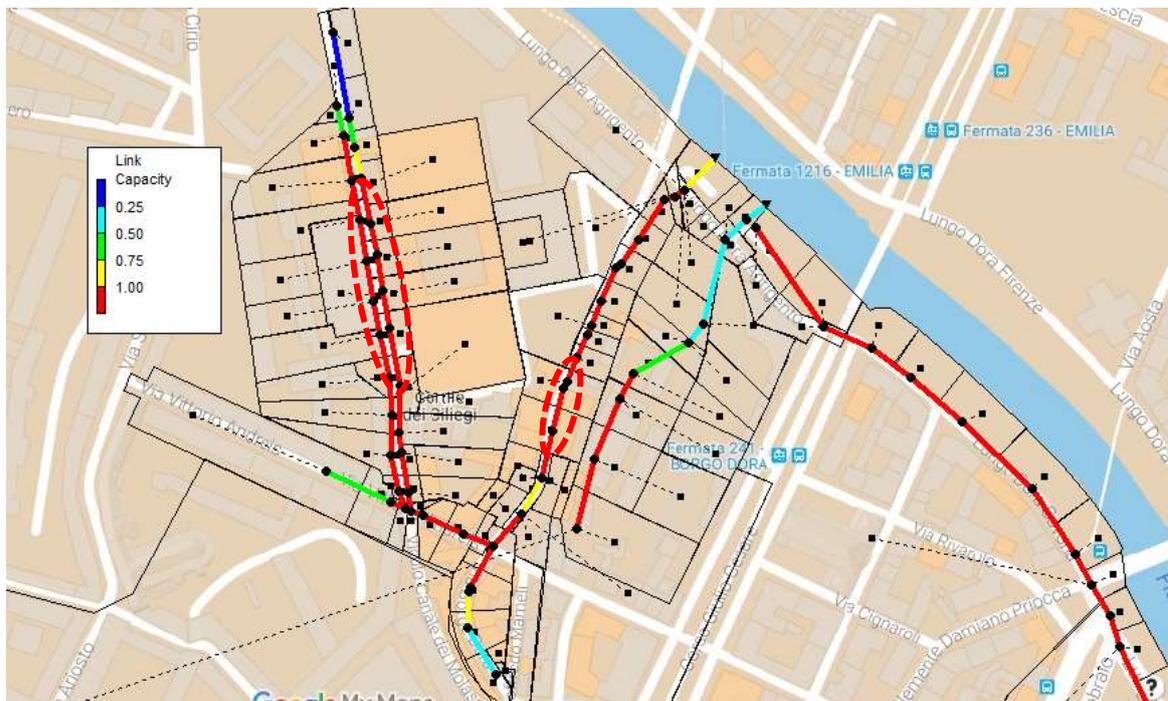
Per tempi di ritorno pari a 5 anni, la rete si trova nuovamente in uno stato di crisi, nonostante l'apertura degli scarichi. La maggior parte dei collettori è in pressione e si hanno degli allagamenti in via Andreis int.18 e in via Borgo Dora (figura 7.12).

In Via Andreis int.18 si verificano allagamenti sia lato dispari (figura 7.13) che lato pari (figura 7.14), anche se quest'ultimi sono più contenuti.

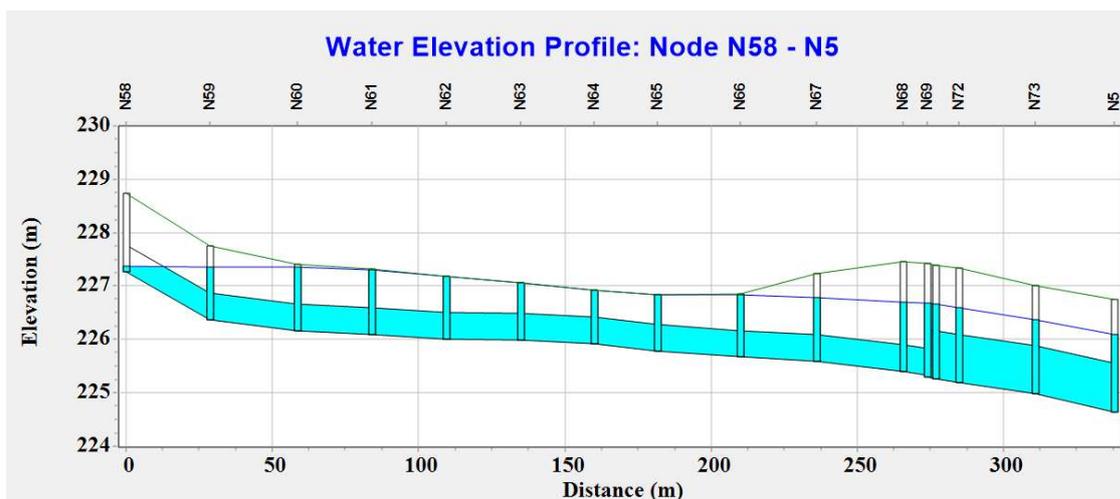
Il collettore in Via Borgo Dora (figura 7.15) si trova quasi completamente in pressione e registra degli allagamenti tra il nodo N8 e N11.

Il Canale delle Sabbionere (figura 7.16), nel tratto iniziale a sezione ovoidale, comincia ad andare in pressione, causando possibili allagamenti nel nodo N41.

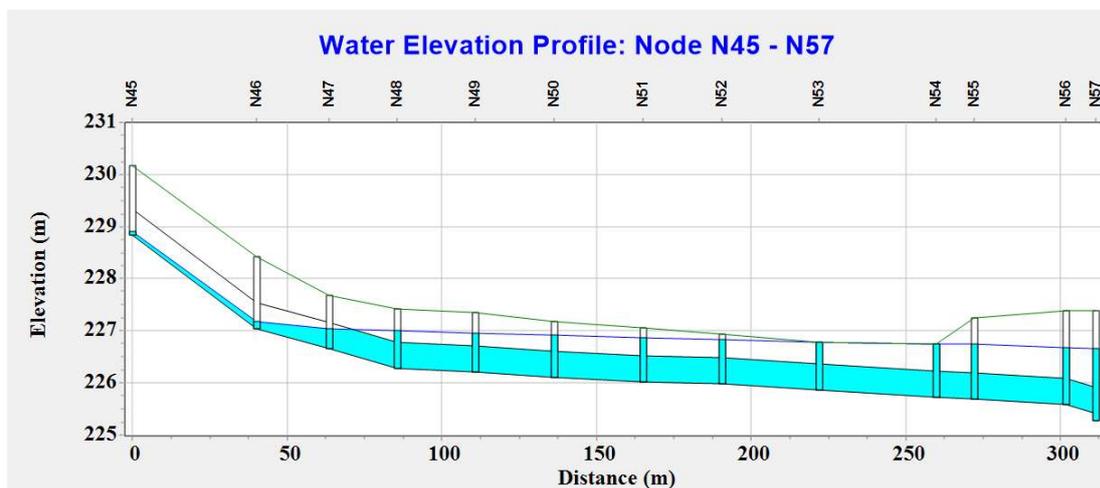
Per quanto riguarda il collettore in Lungo Dora (figura 7.17), non si verificano allagamenti, ma risulta essere in pressione per buona parte della sua estensione.



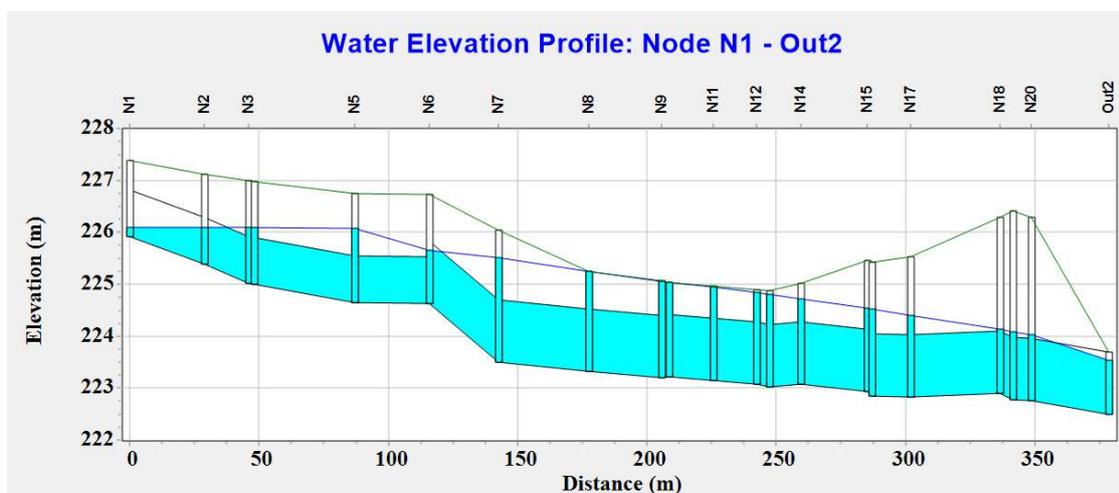
**Figura 7. 12:** Prestazioni della rete con apertura scarichi per TR = 5 anni, in rosso sono evidenziati i collettori in pressione, le zone tratteggiate rappresentano gli allagamenti.



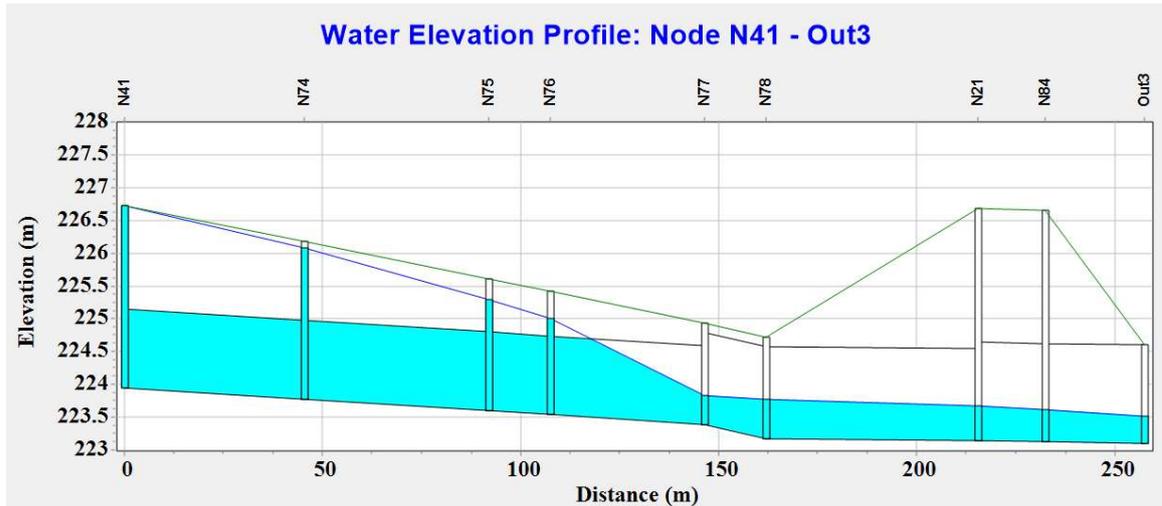
**Figura 7. 13:** Profilo longitudinale del collettore in Via Andreis int.18 (lato dispari) in seguito all'apertura degli scarichi per TR = 5 anni.



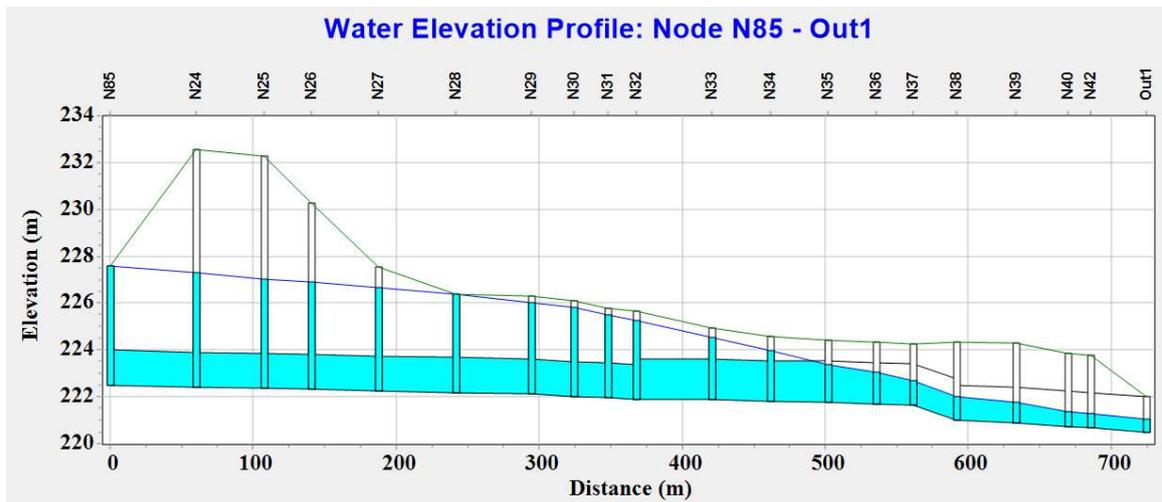
**Figura 7. 14:** Profilo longitudinale del collettore in Via Andreis int.18 (lato pari) in seguito all'apertura degli scarichi per TR = 5 anni.



**Figura 7. 15:** Profilo longitudinale del collettore in Via Borgo Dora con apertura degli scarichi per TR = 5 anni.



**Figura 7.16:** Profilo longitudinale del Canale delle Sabbionere in seguito all'apertura degli scarichi per TR = 5 anni.



**Figura 7.17:** Profilo longitudinale del collettore in Lungo Dora con apertura scarichi per TR = 5 anni.

## 7.4 Simulazione con LID e apertura scarichi TR=5 anni

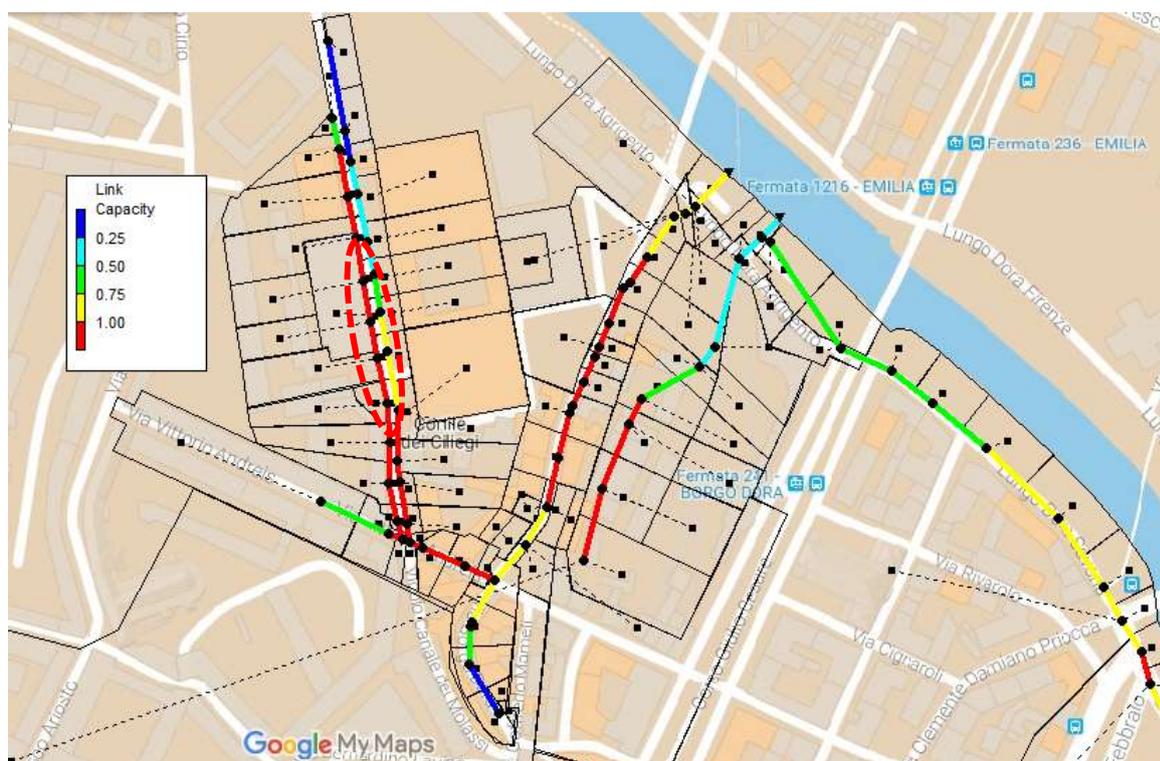
L'inserimento dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile, nel modello con apertura degli scarichi e tempi di ritorno pari a 5 anni, sortisce degli effetti positivi In Via Andreis int.18 lato pari, in Via Borgo Dora e in Lungo Dora (figura 7.18).

Confrontando la situazione senza LID e con, si nota che in Via Andreis int.18 lato pari (figura 7.19), non si verificano più allagamenti e il tratto, in cui il collettore è in pressione, è più contenuto. Nel caso del lato dispari, invece, l'effetto del rigurgito è così preponderante che non vi è alcuna differenza se vengono inserite delle pratiche LID.

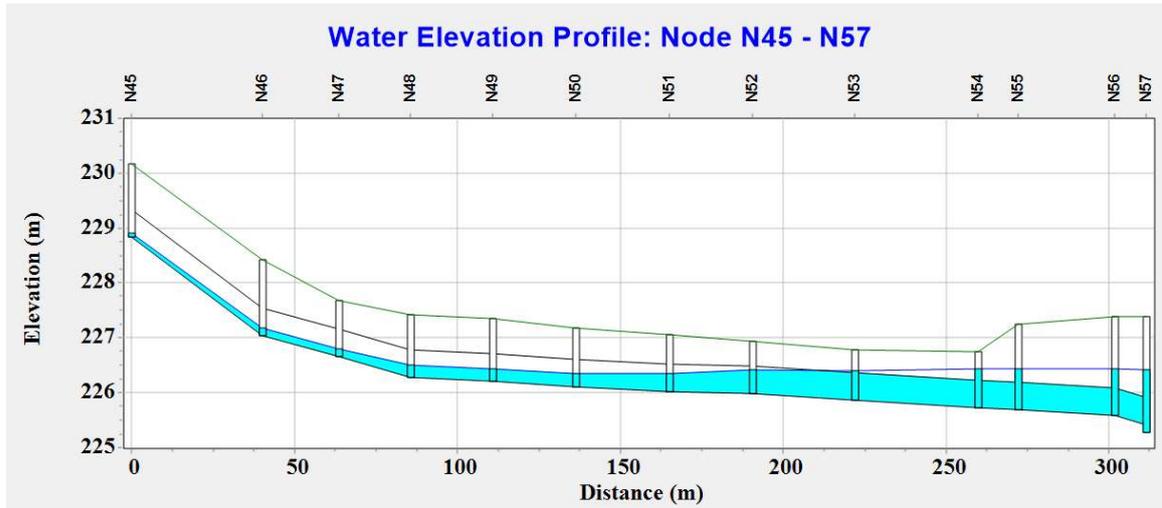
Per quanto riguarda Via Borgo Dora (figura 7.20), il posizionamento di pavimentazione permeabile e di aree di bioretensione riesce ad impedire gli allagamenti, ma non che i collettori entrino in pressione.

Come per la simulazione per tempi di ritorno di 2 anni, la pavimentazione drenante, posta nei sottobacini relativi al Canale delle Sabbionere, non sortisce nessun effetto positivo rimarcabile.

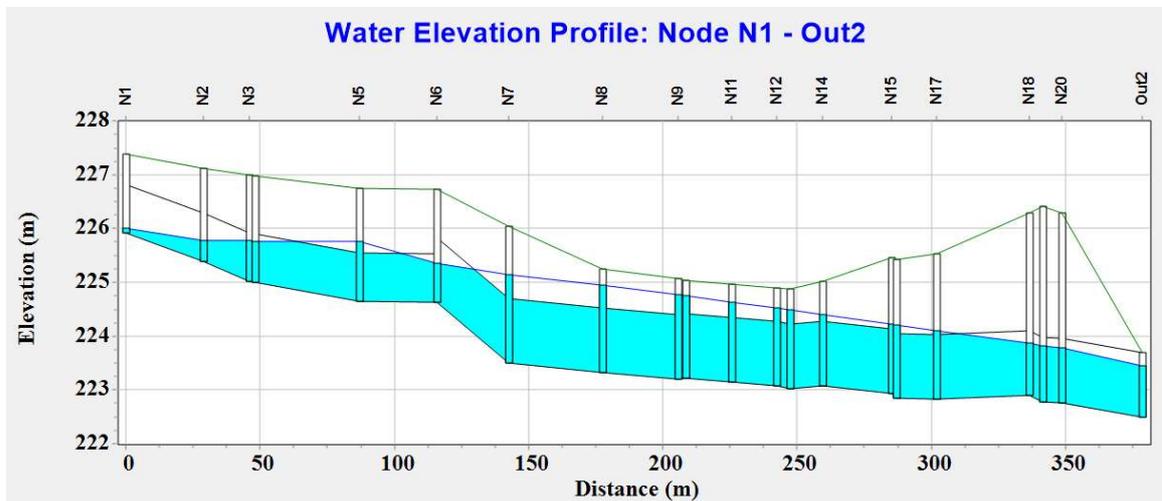
In Lungo Dora (figura 7.21), le bioretensioni abbassano il livello della piezometrica, riducendo notevolmente il tratto in cui il collettore si trova in pressione.



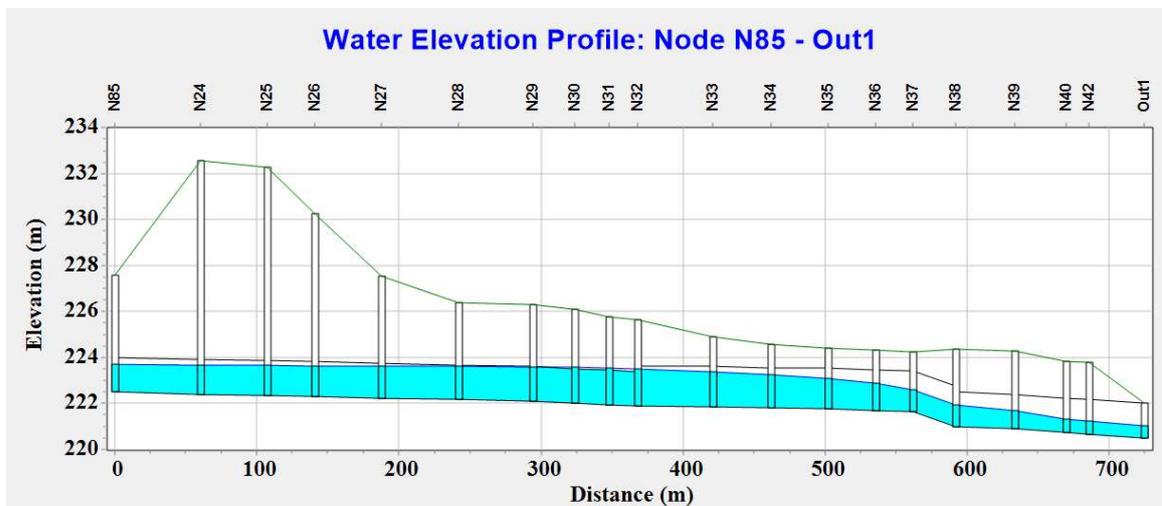
**Figura 7. 18:** Stato della rete con apertura scarichi e pratiche LID per TR = 5 anni, in rosso sono evidenziati i collettori in pressione, le zone tratteggiate rappresentano gli allagamenti.



**Figura 7. 19:** Profilo longitudinale del collettore in Via Andreis int.18 (lato pari) in seguito all'apertura degli scarichi e all'introduzione delle pratiche LID per TR = 5 anni.



**Figura 7. 20:** Profilo longitudinale del collettore in Via Borgo Dora con apertura scarichi e LID per TR = 5 anni.



**Figura 7. 21:** Profilo longitudinale del collettore in Lungo Dora con apertura scarichi e LID per TR = 5 anni.

## 7.5 Commenti

In seguito all'apertura degli scarichi, l'introduzione di pratiche LID ha un ulteriore effetto positivo di alleggerimento dei collettori.

Infatti, per  $TR = 2$  anni, si risolvono quasi del tutto le problematiche della rete, poiché non vi sono più collettori in pressione, ad eccezione di un brevissimo tratto in Via Andreis int.18 lato dispari.

Nel caso di eventi con  $TR = 5$  anni, le aree di bioretensione, i tetti verdi e le pavimentazioni permeabili impediscono gli allagamenti in Via Borgo Dora e in Via Andreis int.18 lato pari e abbassano il livello dell'acqua all'interno dei collettori di Via Borgo Dora e in Lungo Dora, in quest'ultimo caso riducono anche il tratto in cui i collettori si trovano in pressione. Il collettore di Via Andreis int.18 lato dispari, in questa situazione, continua ad avere problemi.

Un ragionamento a parte merita la situazione dei sottobacini drenati dal Canale delle Sabbionere. Tale tratto di rete fognaria non ha mostrato significativi cambiamenti in nessuna delle simulazioni viste, rispetto al caso con LID e senza. Infatti, questi collettori ricevono gli afflussi provenienti da un'area pari a circa il 90% dell'area totale trattata dal Canale, quindi l'effetto benefico delle LID non è preponderante rispetto a quello totale. Per tale motivo, l'inserimento di pavimentazioni permeabili all'interno del parcheggio della GTT nei pressi di Ponte Mosca, può considerarsi non necessario.

## Conclusioni

L'urbanizzazione spesso causa delle problematiche all'interno dei sistemi di drenaggio, infatti, con l'impermeabilizzazione del suolo, aumenta il deflusso superficiale e quindi il volume d'acqua che viene convogliato dalla rete. Un sistema fognario dimensionato correttamente, con il passare del tempo può entrare in crisi, se non è in grado di drenare il quantitativo d'acqua che aumenta a causa del fenomeno dell'urbanizzazione.

L'esigenza di risolvere queste complicazioni ha portato alla ricerca di soluzioni alternative rispetto alla classica sostituzione dei collettori.

La presente tesi vuole mettere in luce nuove pratiche come le aree di bioretensione, le pavimentazioni permeabili e i tetti verdi, che vengono complessivamente chiamate LID o sistemi di drenaggio urbano sostenibile. Esse manifestano molteplici effetti positivi nei confronti della quantità e della qualità dell'acqua, della biodiversità e dell'estetica dell'ambientale in cui sono localizzate.

In particolare, lo studio svolto ha come obiettivo il confronto fra lo stato iniziale senza LID e lo stato finale con LID di un caso reale per differenti tempi di ritorno (2 e 5 anni).

La zona analizzata è il rione Borgo Dora di Torino, la cui rete si trova in uno stato di profonda crisi. Per tempi di ritorno di 2 anni, quindi per eventi abbastanza frequenti, la maggior parte dei collettori è in pressione e si registrano allagamenti in Via Andreis int.18 e in Via Borgo Dora.

Dopo aver introdotto nell'area dei sistemi di drenaggio sostenibile (tabella 8.1), si è potuto valutare il loro effetto benefico.

**Tabella 8.1:** Tipologia di LID inserite nel rione Borgo Dora

<b>Zona</b>	<b>LID inserite</b>
Via Andreis int.18	Pavimentazioni permeabili, tetti verdi, aree di bioretensione
Via Borgo Dora	Pavimentazioni permeabili, aree di bioretensione
Canale delle Sabbionere	Pavimentazioni permeabili
Lungo Dora	Aree di bioretensione

## **Risultati e commenti**

I risultati ottenuti hanno mostrato che l'introduzione delle LID, senza ulteriori modifiche nei collettori, è efficace per attenuare le problematiche in Via Andreis int. 18, infatti, non si verificano più allagamenti.

Per gli altri collettori che drenano aree più estese, sono necessari delle modifiche all'interno della rete in concomitanza con le pratiche LID. Nello specifico, si ipotizza di aprire due nuovi scarichi, questi, alleggerendo la portata all'interno del collettore, rendono tangibili gli effetti benefici delle LID. Quindi, si propone una modifica nella rete che riguarda l'apertura di due scarichi e l'inserimento delle pavimentazioni permeabili, dei tetti verdi e dei sistemi di bioretensione nell'area.

Per tempi di ritorno di 2 anni si risolve quasi completamente lo stato di crisi della rete, in quanto non vi sono più collettori in pressione, ad eccezione di un breve tratto finale in Via Andreis int.18.

Per eventi con tempi di ritorno pari a 5 anni, invece, si verificano degli allagamenti solo in Via Andreis int.18 lato dispari, ma vengono impediti in Via Borgo Dora. Inoltre, la presenza di LID riduce il livello dell'acqua all'interno dei condotti in Lungo Dora.

Tutti i sistemi di drenaggio urbano sostenibile hanno dimostrato la loro utilità per l'adeguato funzionamento della rete sita in Borgo Dora, ad eccezione delle pavimentazioni permeabili dei sottobacini relativi al Canale delle Sabbionere. In tale area, non vi sono stati significativi cambiamenti tra il caso con e senza LID, quindi il loro inserimento si può considerare non opportuno.

## **Sviluppi futuri**

Le problematiche di Via Borgo Dora, che sono direttamente collegate a quelle di Via Andreis int. 18 a causa dell'effetto rigurgito, vengono soprattutto provocate dalla portata proveniente dall'area di monte drenata dal Canale delle Sabbionere. Invece, i problemi in Lungo Dora sono causati in parte anche dall'immissione della portata dovuta all'area compresa tra Corso Giulio Cesare e Via Priocca. Queste due zone vengono semplicemente modellate come delle macroaree che riversano la loro portata nei collettori, la prima all'inizio del Canale delle Sabbionere, la seconda a metà di Lungo Dora Savona. La loro estensione è rispettivamente di 20 e 6 ettari.

Nella presente tesi vengono analizzati nel dettaglio i sottobacini limitrofi ai collettori, notando che, con l'apertura degli scarichi, l'inserimento delle LID è sufficiente per risolvere lo stato di crisi per TR = 2 anni, mentre, senza tale intervento, le LID da sole non riescono ad evitare gli allagamenti in Via Borgo Dora.

Futuri sviluppi potranno considerare se la realizzazione di LID nelle due macroaree a monte possa ridurre ulteriormente i problemi di allagamento e sovrappressione dei collettori,

senza che sia necessaria l'apertura degli scarichi. Nello specifico, le due zone dovranno essere suddivise in sottobacini più piccoli e si dovrà svolgere un'analisi cartografica e topografica per capire l'esatta posizione dei collettori.

Lo studio svolto non ha la presunzione di affermare che, nel caso di zona Borgo Dora, la soluzione proposta sia praticamente di facile applicazione. Ma vuole dimostrare l'effettiva efficacia delle tecniche LID ed essere motivo di riflessione per una più moderna concezione dei sistemi di drenaggio, non più concepiti senza tener conto delle mutazioni che le superfici urbane subiscono nel tempo.

L'approccio proposto dalle LID si contrappone all'approccio tradizionale. Nel primo si cerca di rallentare e ridurre il deflusso superficiale tramite l'infiltrazione, la raccolta e l'immagazzinamento della portata nel sito, questo apporta degli effetti benefici anche nella qualità dell'acqua. Nel secondo, invece, si cerca di ridurre il picco di portata di deflusso attraverso la rapida rimozione d'acqua per evitare l'allagamento, disinteressandosi dei problemi legati all'inquinamento.



# Appendice A

## Confronto fra gli “Status Report” del modello finale e iniziale

Gli “Status Report” di SWMM sono stati ottenuti svolgendo una simulazione per eventi con tempi di ritorno pari a 2 anni. Sotto vengono confrontati i risultati ottenuti per il modello finale di 126 sottobacini e quello iniziale di 84.

### Modello finale 126 sottobacini

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

-----  
NOTE: The summary statistics displayed in this report are based on results found at every computational time step, not just on results from each reporting time step.

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

Analysis Options

\*\*\*\*\*

Flow Units ..... CMS

Process Models:

Rainfall/Runoff ..... YES

RDII ..... NO

Snowmelt ..... NO

Groundwater ..... NO

Flow Routing ..... YES

Ponding Allowed ..... NO

Water Quality ..... NO

Infiltration Method ..... CURVE\_NUMBER

Flow Routing Method ..... DYNWAVE

Surcharge Method ..... EXTRAN

Starting Date ..... 05/10/2017 00:10:00

Ending Date ..... 05/10/2017 04:00:00

Antecedent Dry Days ..... 0.0

Report Time Step ..... 00:01:00

Wet Time Step ..... 00:01:00

### Modello iniziale 84 sottobacini

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

-----  
NOTE: The summary statistics displayed in this report are based on results found at every computational time step, not just on results from each reporting time step.

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

Analysis Options

\*\*\*\*\*

Flow Units ..... CMS

Process Models:

Rainfall/Runoff ..... YES

RDII ..... NO

Snowmelt ..... NO

Groundwater ..... NO

Flow Routing ..... YES

Ponding Allowed ..... NO

Water Quality ..... NO

Infiltration Method ..... CURVE\_NUMBER

Flow Routing Method ..... DYNWAVE

Surcharge Method ..... EXTRAN

Starting Date ..... 05/10/2017 00:10:00

Ending Date ..... 05/10/2017 04:00:00

Antecedent Dry Days ..... 0.0

Report Time Step ..... 00:01:00

Wet Time Step ..... 00:01:00

Dry Time Step ..... 00:01:00  
 Routing Time Step ..... 0.10 sec  
 Variable Time Step ..... YES  
 Maximum Trials ..... 8  
 Number of Threads ..... 1  
 Head Tolerance ..... 0.001500 m

Dry Time Step ..... 00:01:00  
 Routing Time Step ..... 0.10 sec  
 Variable Time Step ..... YES  
 Maximum Trials ..... 8  
 Number of Threads ..... 1  
 Head Tolerance ..... 0.001500 m

```
*****
Volume  Depth
Runoff Quantity Continuity  hectare-m  mm
*****
Total Precipitation ..... 1.626  21.900
Evaporation Loss ..... 0.000  0.000
Infiltration Loss ..... 0.064  0.858
Surface Runoff ..... 1.368  18.424
Final Storage ..... 0.196  2.637
Continuity Error (%) ..... -0.085
```

```
*****
Volume  Depth
Runoff Quantity Continuity  hectare-m  mm
*****
Total Precipitation ..... 1.626  21.900
Evaporation Loss ..... 0.000  0.000
Infiltration Loss ..... 0.064  0.860
Surface Runoff ..... 1.371  18.472
Final Storage ..... 0.192  2.587
Continuity Error (%) ..... -0.082
```

```
*****
Volume  Volume
Flow Routing Continuity  hectare-m  10^6 ltr
*****
Dry Weather Inflow ..... 0.000  0.000
Wet Weather Inflow ..... 1.368  13.676
Groundwater Inflow ..... 0.000  0.000
RDII Inflow ..... 0.000  0.000
External Inflow ..... 0.000  0.000
External Outflow ..... 1.256  12.561
Flooding Loss ..... 0.100  0.999
Evaporation Loss ..... 0.000  0.000
Exfiltration Loss ..... 0.000  0.000
Initial Stored Volume .... -0.000  -0.003
Final Stored Volume ..... 0.013  0.134
Continuity Error (%) ..... -0.154
```

```
*****
Volume  Volume
Flow Routing Continuity  hectare-m  10^6 ltr
*****
Dry Weather Inflow ..... 0.000  0.000
Wet Weather Inflow ..... 1.371  13.709
Groundwater Inflow ..... 0.000  0.000
RDII Inflow ..... 0.000  0.000
External Inflow ..... 0.000  0.000
External Outflow ..... 1.260  12.599
Flooding Loss ..... 0.099  0.991
Evaporation Loss ..... 0.000  0.000
Exfiltration Loss ..... 0.000  0.000
Initial Stored Volume .... -0.000  -0.003
Final Stored Volume ..... 0.013  0.134
Continuity Error (%) ..... -0.138
```

```
*****
Time-Step Critical Elements
*****
None
```

```
*****
Time-Step Critical Elements
*****
None
```

\*\*\*\*\*

Highest Flow Instability Indexes

\*\*\*\*\*

- Link C51 (7)
- Link C53 (7)
- Link C52 (7)
- Link C54 (6)
- Link C15 (6)

\*\*\*\*\*

Routing Time Step Summary

\*\*\*\*\*

Minimum Time Step : 0.10 sec  
 Average Time Step : 0.10 sec  
 Maximum Time Step : 0.10 sec  
 Percent in Steady State : -0.00  
 Average Iterations per Step : 2.32  
 Percent Not Converging : 2.00

\*\*\*\*\*

Analysis begun on: Mon Feb 25 14:22:57 2019

Analysis ended on: Mon Feb 25 14:23:08 2019

\*\*\*\*\*

Highest Flow Instability Indexes

\*\*\*\*\*

- Link C53 (7)
- Link C51 (7)
- Link C52 (7)
- Link C54 (7)
- Link C15 (6)

\*\*\*\*\*

Routing Time Step Summary

\*\*\*\*\*

Minimum Time Step : 0.10 sec  
 Average Time Step : 0.10 sec  
 Maximum Time Step : 0.10 sec  
 Percent in Steady State : -0.00  
 Average Iterations per Step : 2.32  
 Percent Not Converging : 1.99

\*\*\*\*\*

Analysis begun on: Mon Feb 25 14:45:54 2019

Analysis ended on: Mon Feb 25 14:46:06 2019



## Appendice B

### Caratteristiche principali dei sottobacini dedicati alle LID

I dati riportati nella tabella seguente rappresentano le proprietà dei sottobacini riservati interamente ai sistemi LID. I valori corrispondono a quelli settati nel “LID Control Editor” e sono stati ricavati dalla sezione “Project Data” di SWMM.

Nella tabella è mostrato il nome con cui viene identificato il sottobacino, la tipologia di LID introdotta (“B-Ret” sono le aree di bioretensione, “G-Roof” i tetti verdi, “P-Pav” le pavimentazioni permeabili), il numero di LID posizionate al suo interno (per l’approccio scelto nella modellazione il numero può essere solo 1), l’area occupata dalla LID, la larghezza equivalente e la percentuale di saturazione iniziale della LID.

**Tabella A:** Proprietà dei sottobacini occupati dai sistemi di drenaggio urbano sostenibile.

Sottobacino	Pratica LID	Numero	Area [m <sup>2</sup> ]	Larghezza equivalente [m]	% Saturazione iniziale
A26	B-Ret	1	350.00	24.14	29
A30	B-Ret	1	900.00	34.29	29
A31	B-Ret	1	950.00	35.19	29
A32	B-Ret	1	1360.00	42.17	29
A33	B-Ret	1	1370.00	41.52	29
A34	B-Ret	1	1030.00	40.39	29
A63	P-Pav	1	392.00	6.5	10
A86	P-Pav	1	162.00	10	10
A88	P-Pav	1	190.00	11	10
A91	P-Pav	1	190.00	11	10
A92	G-Roof	1	2571.00	39	30
A97	P-Pav	1	166.00	11	10
A98	P-Pav	1	156.00	10	10
A99	P-Pav	1	190.00	11.8	10
A101	P-Pav	1	195.00	12	10
A103	P-Pav	1	168.00	12	10
A105	P-Pav	1	184.00	13	10
A109	B-Ret	1	435.00	18	29
A111	B-Ret	1	320.00	17	29
A112	B-Ret	1	312.00	16	29
A115	B-Ret	1	300.00	15	29
A116	G-Roof	1	3686.00	38	30
A117	B-Ret	1	403.00	17	29

APPENDICE B

A118	B-Ret	1	444.00	19	29
A122	P-Pav	1	172.00	10	10
A123	P-Pav	1	150.00	11	10
A124	P-Pav	1	126.00	11	10
A129	P-Pav	1	2544.00	43	10
A131	B-Ret	1	841.00	8	29
A133	P-Pav	1	1054.00	13	10
A135	P-Pav	1	1020.00	14	10
A136	B-Ret	1	1220.00	20	29
A137	B-Ret	1	890.00	32	29
A139	B-Ret	1	364.00	15	29
A141	B-Ret	1	1195.00	40	29
A143	B-Ret	1	1175.00	24	29
A146	P-Pav	1	2015.00	22	10
A148	P-Pav	1	1425.00	16	10
A150	P-Pav	1	743.00	10	10
A152	P-Pav	1	1224.00	17	10
A158	B-Ret	1	177.00	16	29
A162	B-Ret	1	210.00	10	29
A164	B-Ret	1	500.00	20	29
A166	P-Pav	1	342.00	31	10
A167	P-Pav	1	680.00	18	10
A174	P-Pav	1	351.00	15	10

## Bibliografia e Sitografia

- [1] Da Deppo L., Datei C. (2009), *Fognature*, Libreria Internazionale Cortina Padova.
- [2] DPCM 04/03/1996, *Disposizioni in materia di risorse idriche* (G.U. 14/03/1996 n° 62)  
Capitolo 8: “Livelli minimi dei servizi che devono essere garantiti in ciascun ambito territoriale ottimale”.
- [3] F. Salerno et al., *Urbanization and climate change impacts on surface water quality: Enhancing the resilience by reducing impervious surfaces*. In: *Water research* (2018), pp. 491-502.
- [4] J. Zischgi et al., *Future trajectories of urban drainage systems: A simple exploratory modeling approach for assessing socio-technical transitions*. In: *Science of the total environment* (2019), pp. 1709-1719.
- [5] Andersson et al., *Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services*. In: *AMBIO* (2014), pp. 445-453.
- [6] Woods Ballard B., Wilson S., Udale-Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. (2015), *The SuDS Manual*, CIRIA.
- [7] L.M. Ahiablame et al., *Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research*. In: *Water Air Soil Pollut* (2012), pp. 4253-4273.
- [8] P. Hamel et al., *Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow: A review*. In: *Journal of Hydrology* (2013), pp. 201-211.
- [9] M. J. Paul et al., *Streams in the Urban Landscape*. In: *Annual Review of Ecology and Systematics* (2001), pp. 333-365.
- [10] R.S. Hoffman et al., *Comparison of pesticides in eight U.S. urban streams*. In: *Environmental Toxicology and Chemistry* (2000), pp. 2249–2258.
- [11] H. E. Golden et al., *Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science*. In: *WIREs Water* (2017)
- [12] [www.fondoambiente.it](http://www.fondoambiente.it)
- [13] Hsieh, C. et al., *Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff*. In: *Journal of Environmental Engineering* (2005), pp. 1521–1531.

- [14] [www.ncsu.edu](http://www.ncsu.edu) , sito della North Carolina State University
- [15] <http://www.greenroofs.com>
- [16] Berndtsson, J. C. et al., *The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality*. In: Science of the Total Environment (2006), pp. 48-63.
- [17] <https://nacto.org> , sito della NACTO (National Association of City Transportation Officials)
- [18] Lewis A. Rossman, Environmental Scientist, Emeritus, U.S. Environmental Protection Agency (2015), *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*.
- [19] 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)*.
- [20] 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*.
- [21] 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*.
- [22] Zhang et al., *Design and Performance Simulation of Road Bioretention Media for Sponge Cities*. In: Journal of Performance of Constructed Facilities (2018), numero articolo 04018061.
- [23] Yang et al., *Rapid assessment of hydrologic performance of low impact development practices under design storms*. In: Journal of the American Water Resources Association (2018), pp. 613-630.
- [24] J. Wu et al., *Effectiveness of low-impact development for urban inundation risk mitigation under different scenarios: a case study in Shenzhen, China*. In: Natural hazards and earth system sciences (2018), pp. 2525-2536.
- [25] A. Palla et I. Gnecco, *Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale*. In: Journal of Hydrology (2015), pp. 361-368.
- [26] X. Liao et al., *Approach for Evaluating LID Measure Layout Scenarios Based on Random Forest: Case of Guangzhou—China*. In: Water (2018), articolo numero 894.

- [27] Perelli, G.A., *"Characterization of the Green Roof Growth Media"*, University of Western Ontario, *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, (2014) Paper 2205.
- [28] Prof. Fulvio Boano, Ing. Stefano Losero, Prof. Luca Ridolfi (Settembre 2017), *Rete di drenaggio in zona Borgo Dora – Analisi delle criticità e interventi migliorativi*.
- [29] <http://geoportale.comune.torino.it/web/sezioni-tematiche>
- [30] <http://www.comune.torino.it/portapalazzo>
- [31] [http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante\\_pioggia\\_webapp/index.html](http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp/index.html)
- [32] <http://www.museotorino.it>
- [33] <http://www.museoferroviariopiemontese.it/officine-porta-milano/>



## **Riconoscimenti**

Si ringrazia il Professor Fulvio Boano, senza le sue costanti indicazioni e la sua grande disponibilità, la realizzazione di questa tesi non sarebbe stata possibile.

Inoltre, colgo l'occasione per citare il lavoro svolto dal Prof. Fulvio Boano, dall'Ing. Stefano Losero e dal Prof. Luca Ridolfi, che è stato fondamentale e il punto di partenza per le considerazioni fatte nella presente tesi.

Infine, a conclusione di questo percorso universitario, vorrei ringraziare la mia famiglia, Antonello, Flavia, i miei veri amici e tutte quelle persone che mi sono state realmente vicine e di supporto in questi anni.