

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



Tesi di Laurea Magistrale

Drenaggio urbano sostenibile: il caso del Politecnico di Torino

Relatori

Prof. Luca Ridolfi

Prof. Fulvio Boano

Ing. Anacleto Rizzo

Candidata

Francesca Rizzo

Luglio 2018

Indice

1	Introduzione	1
2	Drenaggio urbano sostenibile	5
2.1	Gestione tradizionale delle acque meteoriche	5
2.1.1	Conseguenze sulle aree urbane	6
2.1.2	Effetti del cambiamento climatico	8
2.2	Gestione sostenibile delle acque meteoriche	8
2.2.1	Tipologie di intervento	9
2.2.2	Benefici per l'ambiente e per l'uomo	12
2.2.3	Coinvolgimento della comunità	15
2.2.4	Adattabilità al cambiamento climatico	16
2.3	Esempi nel mondo	16
2.3.1	Benthemplein Water Square	17
2.3.2	Tanner Springs Park	18
2.3.3	Derbyshire Street	19
3	Caso del Politecnico di Torino	21
3.1	Raccolta dei dati	21
3.1.1	Sede Centrale	23
3.1.2	Cittadella	24
3.2	Criteri di selezione delle aree verdi	26
3.3	Aree verdi scelte	27
3.3.1	Prima configurazione proposta	28
3.3.2	Seconda configurazione proposta	29
3.3.3	Terza configurazione proposta	30
4	Schema di analisi di un'area verde	31
4.1	Caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche	31
4.2	Modellazione delle precipitazioni	33
4.3	Modellazione del processo di infiltrazione	34
4.3.1	Intensità di arrivo inferiore alla capacità d'infiltrazione	39
4.3.2	Intensità di arrivo superiore alla capacità d'infiltrazione	40
4.3.3	Valutazione della capacità d'infiltrazione	41
4.3.4	Valutazione della portata in uscita	45
4.4	Modellazione del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata	46
4.4.1	Bocca di scarico collocata all'estremità superiore dell'area verde	47
4.4.2	Bocca di scarico collocata all'estremità inferiore dell'area verde	48
4.5	Elaborazione del programma	49

5	Area verde A	51
5.1	Analisi delle caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche	51
5.2	Analisi dell'andamento delle precipitazioni	53
5.3	Analisi del processo di infiltrazione	54
5.3.1	Prima fase di studio	56
5.3.2	Seconda fase di studio	60
5.4	Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata	78
5.5	Conclusioni	79
6	Area verde B	83
6.1	Analisi delle caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche	83
6.2	Analisi dell'andamento delle precipitazioni	85
6.3	Analisi del processo di infiltrazione	85
6.3.1	Confronto al variare del tempo di ritorno	89
6.3.2	Confronto al variare dello spessore	91
6.3.3	Confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo	93
6.3.4	Confronto al variare della tipologia di terreno	96
6.3.5	Confronto in presenza di materiale alveolare	98
6.4	Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata	101
6.5	Conclusioni	102
7	Aree verdi C	105
7.1	Analisi delle caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche	105
7.2	Analisi dell'andamento delle precipitazioni	107
7.3	Analisi del processo di infiltrazione	107
7.3.1	Confronto al variare del tempo di ritorno	112
7.3.2	Confronto al variare dello spessore	113
7.3.3	Confronto al variare della tipologia di terreno	115
7.3.4	Confronto in presenza di materiale alveolare	118
7.4	Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata	120
7.5	Conclusioni	121
8	Aree verdi D	123
8.1	Analisi delle caratteristiche delle aree verdi e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche	124
8.1.1	Area verde D1	124
8.1.2	Area verde D2	126
8.1.3	Area verde D3	127
8.2	Analisi dell'andamento delle precipitazioni	128
8.3	Analisi del processo di infiltrazione	128
8.3.1	Prima fase di studio	128
8.3.2	Seconda fase di studio	138
8.4	Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata	149
8.5	Conclusioni	151
9	Conclusioni	153

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito delle aree urbanizzate, l'intenso sfruttamento del territorio dovuto alla costruzione di infrastrutture stradali, insediamenti civili, zone industriali ed artigianali ha alterato il paesaggio naturale, determinando una crescente impermeabilizzazione del suolo. Ciò ha influenzato negativamente il ciclo naturale dell'acqua, disturbando l'equilibrio fra precipitazione, assorbimento all'interno del suolo (infiltrazione) o dalle piante (traspirazione), evaporazione e deflusso superficiale. Si è quindi giunti ad una situazione in cui l'acqua piovana defluisce quasi interamente, mentre i processi di evaporazione, traspirazione ed infiltrazione vengono fortemente limitati.

L'approccio tradizionale al drenaggio urbano ha risposto a questo quadro generale raccogliendo tutti i deflussi meteorici dalle superfici impermeabilizzate, immettendoli all'interno della rete fognaria, trattandoli ed infine scaricandoli all'interno di un corpo idrico recettore. Questa metodologia ha determinato l'insorgenza di numerosi effetti negativi, quali possibile sovraccarico della rete fognaria, alterazione del regime ed inquinamento del corpo idrico recettore, ridotta alimentazione della falda acquifera, deterioramento del microclima, frammentazione degli habitat della fauna selvatica ed elevato costo di smaltimento delle acque meteoriche. Esse rappresentano problematiche che vanno a minare la salvaguardia sia dell'ambiente che dell'uomo e che sono ulteriormente accentuate dagli effetti dei cambiamenti climatici in atto.

Di conseguenza, si è messa in luce l'esigenza di adottare un approccio più efficiente ed innovativo nel gestire le acque meteoriche che cadono sulle aree urbane. In questo ambito si inserisce quindi il concetto di "drenaggio urbano sostenibile", la cui filosofia consiste nel massimizzare i benefici e minimizzare gli impatti negativi del deflusso superficiale dell'acqua piovana all'interno delle zone urbanizzate. Si tratta di una metodologia di gestione delle acque meteoriche finalizzata a ristabilire il ciclo naturale dell'acqua, andando a raccogliere, infiltrare, rallentare, immagazzinare, convogliare e trattare il deflusso superficiale.

L'approccio di drenaggio urbano sostenibile persegue l'obiettivo di raggiungere quattro categorie generali di benefici: supportare la gestione del rischio di inondazione e ristabilire il ciclo naturale dell'acqua (quantità dell'acqua), gestire la qualità del deflusso superficiale per prevenire fenomeni di inquinamento (qualità dell'acqua), realizzare e sostenere luoghi migliori in cui fauna e flora possano svilupparsi (biodiversità) e le persone possano vivere (amenità).

Allo scopo di fissare al meglio la filosofia della gestione sostenibile delle acque meteoriche, si cita a titolo di esempio The Circle, un premiato spazio pubblico multifunzionale collocato a Normal, in Illinois (vedasi Figura 1.1). Esso è ubicato in corrispondenza di una rotatoria e fornisce uno spazio verde che ospita molti eventi della comunità, quali festival d'arte, mercati contadini e festival di blues. The Circle raccoglie l'acqua piovana che defluisce sulla superficie delle strade circostanti e la sottopone a infiltrazione, immagazzinamento e trattamento, allo scopo di alleviare il rischio di allagamento a valle. In un secondo momento l'acqua viene fatta circolare all'interno di una fontana pubblica, che va a rinfrescare l'area.

Lo spazio realizzato va anche a ridurre l'intensità del rumore emesso dai veicoli che transitano nelle vicinanze.



(a) Fonte: Scott Shigley



(b) Fonte: Hoerr Schaudt Landscape Architects

Figura 1.1: *The Circle*

Dal punto di vista dell'applicazione di questo efficiente ed innovativo approccio, si è potuta riscontrare la presenza di numerosi interventi di drenaggio urbano sostenibile a livello internazionale, in particolare negli stati del nord Europa. Per quanto concerne invece l'Italia, risulta ancora ampiamente preponderante l'approccio tradizionale di gestione delle acque meteoriche: questa situazione è soprattutto dovuta alla struttura storico-urbanistica delle città italiane, più complessa rispetto a quella delle città nord-europee. Risulta quindi fondamentale avviare un cambio culturale nella gestione delle acque meteoriche, promuovendone il seguente cambiamento di visione: da problema che deve essere "allontanato" il più in fretta possibile a preziosa risorsa da cui trarre vantaggi sia per l'ambiente che per l'uomo.

Focalizzandosi in particolare sulla città di Torino, all'interno della quale si collocano gli interventi proposti nell'ambito del presente elaborato di tesi, è stato riscontrato un numero esiguo di applicazioni delle tecniche di drenaggio urbano sostenibile. A titolo di esempio si può citare il Condominio 25 Verde, un "edificio-foresta" progettato dall'architetto Luciano Pia e collocato a pochi passi dal Parco del Valentino e dal Centro Storico Fiat. In questo ambito, si è andato a ricreare un sistema verde caratterizzato dalla presenza di diversi elementi: dalle fioriere al giardino, dal verde pensile in copertura (tetto verde) al verde verticale in facciata (parete verde). L'ampia presenza del verde, oltre a giocare un ruolo fondamentale nella percezione dell'edificio, aiuta a migliorare il microclima interno, andando a svolgere il ruolo di isolante termico. Inoltre la presenza di sistemi di raccolta delle acque meteoriche consente il mantenimento del verde senza la necessità di appoggiarsi alla rete idrica cittadina.

Il presente elaborato di tesi si pone l'obiettivo di applicare l'approccio sostenibile di gestione delle acque di pioggia nell'ambito del Politecnico di Torino. Si tratta del contesto migliore per poter promuovere il passaggio a questa efficiente ed innovativa metodologia, dal momento che esso si è posto l'obiettivo di accrescere la consapevolezza del proprio ruolo sociale attraverso l'educazione alla cultura della sostenibilità. Allineandosi alle migliori università internazionali, il Politecnico di Torino ha infatti avviato un percorso di accreditamento come campus sostenibile, favorendo anche l'attuazione di azioni sinergiche con gli enti locali nell'ambito di una visione sostenibile del territorio. In questo frangente, l'università ha elaborato un piano strategico denominato "Orizzonte 2020", proiettato verso le priorità del Programma Quadro europeo per la Ricerca e l'Innovazione "Horizon 2020", allo scopo di accreditare il Politecnico di Torino tra le migliori università tecniche europee.

Nell'ambito di questo percorso di accreditamento si colloca l'azione del "Green Team", un gruppo di professori, studenti, personale amministrativo e ricercatori che incoraggia l'università ad affrontare sfide ambientali e sociali. Questa squadra ha infatti il compito di guidare il Politecnico di Torino verso la missione di sostenibilità universitaria, come affermato nel piano strategico Orizzonte 2020: va quindi a perseguire un'integrazione globale della sostenibilità nella ricerca universitaria, nell'insegnamento, nell'informazione e nelle attività, preparando gli studenti, la

facoltà ed il personale a essere leader in questo campo.

Dal momento che quanto proposto all'interno del presente elaborato di tesi rappresenta un primo approccio alla tematica di drenaggio urbano sostenibile nell'ambito del Politecnico di Torino, si è scelto di agire sulle aree verdi già presenti, rendendole soggetti attivi nella gestione delle acque meteoriche. Si è quindi promosso un cambiamento di concezione delle zone verdi, andando oltre la loro visione puramente estetica ed attribuendogli un ruolo fondamentale nell'ambito del drenaggio urbano.

A livello pratico, si è quindi ipotizzato di convogliare una quota delle acque meteoriche che cadono sull'area dell'università verso una parte delle aree verdi presenti: favorendo il processo d'infiltrazione dell'acqua piovana all'interno di queste ultime, si è posto l'obiettivo di ridurre il carico che giunge all'interno della rete fognaria bianca e di effettuare un processo di trattamento. In primo luogo il presente elaborato di tesi si è focalizzato sull'analisi del problema di gestione delle acque meteoriche, approfondendo la filosofia del drenaggio urbano sostenibile e le tipologie di intervento che possono essere attuate (vedasi capitolo 2).

In seguito l'attenzione si è concentrata sul Politecnico di Torino, del quale sono state analizzate due sedi: la Sede Centrale e la Cittadella. Si è quindi valutato sia l'uso del suolo che il sistema di convogliamento delle acque meteoriche relativi alle due sedi considerate, individuando le aree verdi migliori per il progetto che si intende realizzare (vedasi capitolo 3).

L'elaborato di tesi si è poi focalizzato sulla definizione delle schema di analisi di ogni singola area verde, modellando l'andamento delle precipitazioni, il processo di infiltrazione dell'acqua piovana all'interno della zona verde ed infine il processo di scarico dell'acqua piovana accumulata sulla superficie verde al termine dell'evento di pioggia (vedasi capitolo 4).

Infine l'attenzione di è concentrata sull'applicazione dello schema di analisi alle aree verdi selezionate, analizzandone il comportamento ed individuandone la configurazione migliore allo scopo prefissato (vedasi capitolo 5, capitolo 6, capitolo 7 e capitolo 8).

Capitolo 2

Drenaggio urbano sostenibile

Il "drenaggio urbano sostenibile", identificato con l'acronimo inglese SuDS (Sustainable Drainage Systems), rappresenta un approccio di gestione delle acque meteoriche che ricadono sulle aree urbane: esso si pone l'obiettivo di cogliere tutte le opportunità e i benefici derivanti dalle acque di pioggia, sia nel presente che nel futuro. Si tratta quindi di una tipologia di approccio secondo cui l'acqua piovana viene considerata non più come un problema da "allontanare" il più in fretta possibile, bensì come una preziosa risorsa da cui trarre vantaggi sia per l'ambiente che per l'uomo.

2.1 Gestione tradizionale delle acque meteoriche

L'intenso sfruttamento del territorio dovuto alla costruzione di infrastrutture stradali, insediamenti urbani e zone industriali e artigianali ha alterato il paesaggio naturale, determinando una crescente impermeabilizzazione del suolo ed influenzando negativamente il ciclo naturale dell'acqua.

In seguito al verificarsi di un evento di precipitazione, l'acqua che cade su una superficie naturale può essere assorbita all'interno del suolo (infiltrazione) o dalle piante (traspirazione), evaporare ed eventualmente giungere all'interno di un ruscello o di un fiume. I processi appena descritti delineano il cosiddetto "ciclo idrologico" e possono essere alterati nel caso in cui il suolo naturale sia modificato dallo sviluppo urbano. Infatti nelle aree soggette all'urbanizzazione vi è una minor presenza di suolo permeabile, disponibile all'infiltrazione, e di piante, disponibili all'evapotraspirazione delle acque meteoriche. La maggior parte di queste ultime va quindi a defluire superficialmente e viene raccolta all'interno della rete fognaria.

In Figura 2.1 viene messo a confronto il ciclo dell'acqua di pioggia nel caso di superfici non impermeabilizzate (vedasi Figura 2.1(a)) rispetto a quello di superfici impermeabilizzate (vedasi Figura 2.1(b)): si può quindi constatare che l'urbanizzazione del territorio determina una netta alterazione del ciclo idrologico. Infatti nel caso di superfici naturali, a copertura vegetale, prevalgono i processi di evapotraspirazione ed infiltrazione nel suolo, con eventuale ricarica della falda acquifera. Il deflusso superficiale invece risulta solitamente compreso fra lo 0% e il 20% del totale della precipitazione. Viceversa nel caso di superfici impermeabilizzate, come ad esempio tetti, strade o parcheggi, prevale il processo di deflusso superficiale, che va ad interessare oltre il 90% del totale della precipitazione.

L'approccio tradizionale al drenaggio urbano consiste nel raccogliere tutti i deflussi meteorici dalle superfici impermeabilizzate, indipendentemente dal loro inquinamento. Questi ultimi vengono immessi all'interno della rete fognaria, un complesso di collettori generalmente sotterranei, trattati ed infine scaricati all'interno di un corpo idrico ricettore. Il sistema delineato è concepito allo scopo di salvaguardare la salute delle persone e prevenire fenomeni locali di allagamento, allontanando le precipitazioni dal punto di caduta il più velocemente possibile.

In particolare la rete fognaria si distingue in due diverse tipologie:

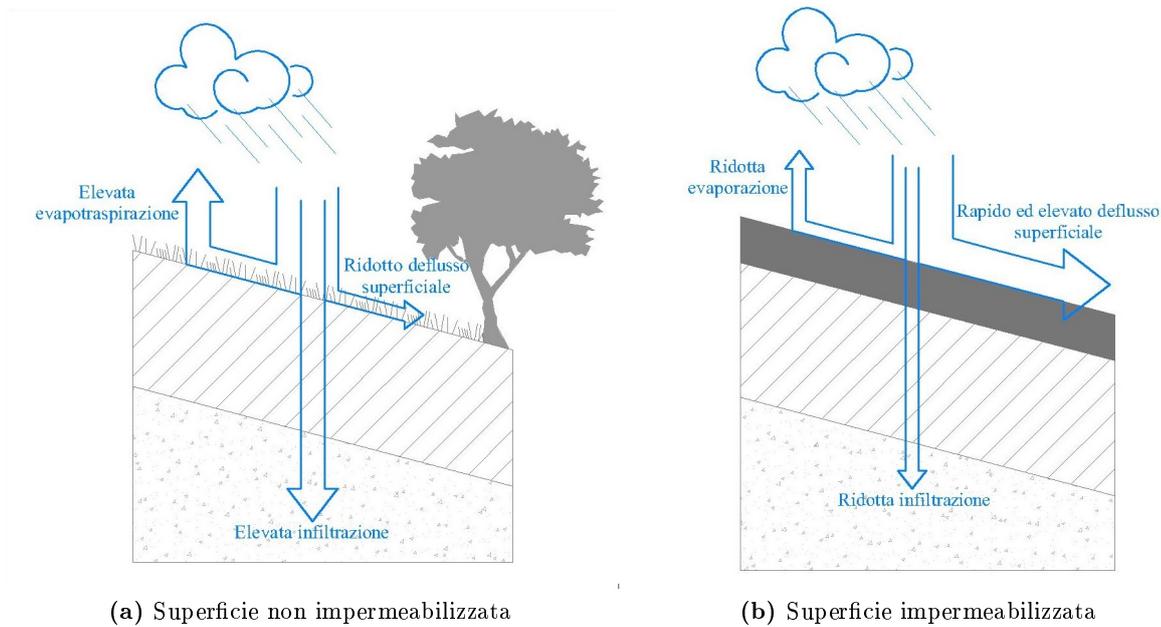


Figura 2.1: *Ciclo dell'acqua di pioggia*

- a sistema unitario (o misto), se le acque meteoriche vengono convogliate insieme alle acque reflue civili e industriali (eventualmente pretrattate) all'interno dello stesso collettore
- a sistema separato, se le acque meteoriche vengono convogliate in collettori distinti da quelli destinati alle acque reflue

Tra le due tipologie, la più diffusa sia a livello mondiale che in Italia è quella a sistema unitario. Indipendentemente dal sistema adottato, l'approccio tradizionale presenta numerosi effetti negativi, di seguito illustrati.

2.1.1 Conseguenze sulle aree urbane

Il drenaggio delle acque meteoriche è stato spesso sottovalutato o affrontato senza la necessaria pianificazione con il risultato che, a fronte della crescente urbanizzazione, sono emerse numerose problematiche:

- sovraccarico della rete fognaria in caso di piogge intense
- alterazione del regime del corpo idrico recettore, con possibili fenomeni di esondazione ed erosione
- ridotta alimentazione della falda acquifera
- inquinamento del corpo idrico recettore
- deterioramento del microclima
- frammentazione degli habitat della fauna selvatica
- elevato costo di smaltimento delle acque meteoriche

Gli effetti negativi appena indicati sono quindi legati al metodo tradizionale di gestione delle acque meteoriche e alla crescente impermeabilizzazione del suolo: all'interno del quadro delineato, è necessario tenere in considerazione anche il ruolo giocato dal cambiamento climatico, approfondito al paragrafo 2.1.2.

Sovraccarico della rete fognaria in caso di piogge intense L'elevato deflusso superficiale causato dalla crescente impermeabilizzazione del suolo viene in massima parte convogliato all'interno della rete fognaria che, in caso di precipitazioni intense, può ricevere portate superiori rispetto a quelle che è in grado di smaltire in sicurezza. Di conseguenza vanno a verificarsi dei rigurgiti e degli allagamenti nelle aree urbane (vedasi Figura 2.2(a)).

Alterazione del regime del corpo idrico recettore L'immissione rilevante e repentina di acque meteoriche, convogliate tramite la rete fognaria, può comportare cambiamenti all'andamento naturale delle portate dei corpi idrici recettori. Possono quindi verificarsi fenomeni sia di esondazione (vedasi Figura 2.2(b)) che di erosione, che comportano delle modifiche alla forma delle sponde del corpo idrico stesso e hanno ripercussioni negative su piante e animali che si trovano all'interno o nei pressi dell'acqua.

Ridotta alimentazione della falda acquifera Nel caso in cui vengano convogliate elevate quantità d'acqua meteorica all'interno della rete fognaria, l'acqua che riesce ad infiltrarsi all'interno del suolo risulta notevolmente ridotta. Questo comporta quindi un abbassamento rilevante del livello della falda acquifera.

Inquinamento del corpo idrico recettore Oltre agli effetti negativi appena delineati, si accompagnano problemi legati agli impatti delle reti fognarie unitarie e separate sulla qualità dei corpi idrici recettori, dovuti al trascinarsi delle sostanze inquinanti che si depositano sulle aree drenate nei periodi di tempo secco all'interno delle acque di deflusso superficiale.

Quando il sistema fognario è unitario, gli impianti di trattamento non sono in grado di depurare il significativo carico che ricevono in caso di precipitazioni intense. Le acque in eccesso vengono solitamente scaricate nei corpi idrici recettori tramite i cosiddetti "scaricatori di piena", direttamente oppure dopo essere state sottoposte ad un trattamento meccanico. Vengono quindi immesse all'interno dei corpi idrici delle sostanze inquinanti, che possono determinare problemi igienico-sanitari.

Anche nel caso del sistema fognario separato possono essere immesse sostanze inquinanti all'interno dei corpi recettori, se non vi sono idonei impianti di trattamento delle acque meteoriche.

Deterioramento del microclima Riprendendo quanto detto in precedenza, la filosofia dell'approccio tradizionale di gestione delle acque meteoriche consiste nell'allontanarle il più velocemente possibile dal punto di caduta. Questo significa che solo una minima parte di esse



(a) Sovraccarico della rete fognaria in caso di piogge intense



(b) Alterazione del regime del corpo idrico recettore

Figura 2.2: Effetti negativi della gestione tradizionale delle acque meteoriche: esempi (Fonte: "The SuDS Manual", Woods Ballard et al.)

può evaporare, determinando quindi una diminuzione dell'umidità dell'aria ed un aumento della temperatura nell'ambiente circostante.

Frammentazione degli habitat della fauna selvatica Oltre a contribuire ad aumentare il processo di deflusso superficiale delle acque meteoriche, la crescente urbanizzazione ha anche ridotto la fauna selvatica presente nelle aree urbane. Gli spazi verdi ancora presenti sono spesso isolati gli uni dagli altri: questo determina una maggior frammentazione degli habitat della fauna selvatica, impedendo ad alcune specie di muoversi attraverso di essi. Inoltre la situazione appena delineata porta alcune specie ad essere separate dal proprio spazio verde, a danno degli ecosistemi locali e della popolazione umana.

Elevato costo di smaltimento delle acque meteoriche Lo smaltimento delle acque meteoriche attraverso l'approccio tradizionale richiede la presenza di reti fognarie di dimensioni rilevanti ed eventualmente di impianti per la ritenzione ed il trattamento delle acque meteoriche: sono quindi necessari elevati costi d'investimento e di gestione.

2.1.2 Effetti del cambiamento climatico

Nell'ambito del quadro appena delineato, risulta necessario prendere in considerazione gli effetti legati al cambiamento climatico che si possono verificare all'interno delle aree urbane.

È ormai evidente che il clima stia subendo un cambiamento a livello globale a causa dell'attività umana e che esso continuerà a mutare nel prossimo secolo, indipendentemente dai tagli drastici che potranno essere effettuati sulle emissioni di gas serra in atmosfera. Le proiezioni climatiche suggeriscono che gli inverni diventeranno più miti e piovosi e le estati più calde. Alcuni eventi estremi, come ondate di caldo, siccità e inondazioni, diventeranno più frequenti ma vi è ancora molta incertezza nel fare previsioni in questo ambito, a causa della naturale variabilità del clima e dei limiti che emergono nel modellarlo.

Ci si attende che inverni più piovosi ed eventi di precipitazione più frequenti e di maggiore intensità (sia in estate che in inverno) andranno ad aumentare il deflusso superficiale nelle aree urbanizzate. Questo andrà a propria volta a peggiorare ulteriormente gli effetti negativi causati dalla crescente impermeabilizzazione del suolo, ovvero il sovraccarico della rete fognaria e l'inquinamento e l'alterazione del regime del corpo idrico recettore, con possibili fenomeni di esondazione ed erosione. Si potranno quindi verificare impatti negativi sia per l'ambiente naturale sia per la popolazione umana ed aumentare la capacità della rete fognaria per affrontare questi rischi crescenti non sarà più una soluzione attuabile.

Le proiezioni sui cambiamenti climatici suggeriscono anche che saranno più frequenti i periodi di siccità. Questa problematica farà aumentare le pressioni sulle scorte d'acqua disponibili e farà emergere l'esigenza di trovare metodi più efficienti ed innovativi nel catturare e nell'utilizzare le acque meteoriche che cadono sulle aree urbane.

2.2 Gestione sostenibile delle acque meteoriche

L'approccio tradizionale di gestione delle acque meteoriche ha dimostrato seri limiti nell'affrontare sia la crescente urbanizzazione del territorio, sia i cambiamenti climatici che si stanno progressivamente verificando. Di conseguenza, è emersa l'evidente necessità di adottare un approccio più efficiente ed innovativo nel catturare e nell'utilizzare le acque meteoriche che cadono sulle aree urbane. In questo ambito si inserisce quindi il concetto di drenaggio urbano sostenibile, la cui filosofia consiste nel massimizzare i benefici e minimizzare gli impatti negativi del deflusso superficiale dell'acqua piovana all'interno delle aree urbanizzate. Le acque meteoriche rappresentano infatti una preziosa risorsa e questo può essere riflesso nel modo in cui sono gestite ed utilizzate nell'ambiente urbano.

L'approccio sostenibile si pone l'obiettivo di riequilibrare il bilancio idrologico, consentendo all'acqua piovana di infiltrarsi all'interno del suolo, promuovendo il processo di evapotraspirazione e gestendo il deflusso superficiale per imitare i tassi e i volumi naturali. Inoltre questa tipologia di approccio mira a ridurre il carico inquinante dei corpi idrici, passando da uno stadio di post-urbanizzazione ad uno stadio di pre-urbanizzazione. È quindi necessario agire sul deflusso superficiale delle acque meteoriche che cadono all'interno di un'area urbana, perseguendo l'obiettivo di gestire i rischi esaminati al paragrafo 2.1.1. Questo si può realizzare raccogliendo, infiltrando, rallentando, immagazzinando, convogliando e trattando il deflusso superficiale delle acque meteoriche in sito e, dove possibile, in superficie più che sottoterra. In questo modo infatti l'acqua diventa una parte visibile e tangibile dell'ambiente urbano e chiunque ne può godere. Un ulteriore aspetto positivo consiste nel fatto che gli interventi di drenaggio urbano sostenibile sono economicamente vantaggiosi e sfruttano meno risorse naturali e, nel corso della loro esistenza, hanno una minor impronta di carbonio rispetto all'approccio tradizionale.

2.2.1 Tipologie di intervento

L'approccio sostenibile comprende un insieme di possibili interventi dalla cui combinazione possono emergere, a seconda delle esigenze e delle condizioni locali, scenari particolari di gestione delle acque meteoriche. Infatti il drenaggio urbano sostenibile non deve essere considerato come un componente individuale ma come un sistema interconnesso progettato per gestire, trattare ed utilizzare al meglio l'acqua superficiale, dal punto in cui quest'ultima cade come precipitazione al punto in cui viene rilasciata nell'ambiente, oltre i confini del sito.

A seconda della loro funzione, gli interventi di drenaggio urbano sostenibile possono essere suddivisi in:

- **sistemi di raccolta dell'acqua di pioggia**, che catturano l'acqua piovana e ne rendono possibile l'utilizzo all'interno degli edifici o dell'ambiente circostante
- **sistemi di superfici permeabili**, strutture che consentono all'acqua di penetrare, riducendo pertanto la quantità di deflusso superficiale che viene convogliata al sistema di drenaggio (ne sono un esempio i tetti verdi e le pavimentazioni permeabili). Molti di questi sistemi includono anche interventi di immagazzinamento sotto la superficie e trattamento
- **sistemi di infiltrazione**, che agevolano l'entrata dell'acqua all'interno del suolo. Essi spesso includono aree di immagazzinamento temporaneo che ospitano i volumi di deflusso superficiale, prima di rilasciarli lentamente nel suolo
- **sistemi di convogliamento**, che incanalano i flussi verso sistemi di immagazzinamento posti a valle. Dove possibile, questi sistemi effettuano anche processi di controllo di flussi e volumi e processi di trattamento (ne sono un esempio i fossi vegetati)
- **sistemi di immagazzinamento**, che controllano i flussi e, dove possibile, i volumi del deflusso superficiale rilasciato da un sito, andando ad immagazzinarlo e a rilasciarlo lentamente (attenuazione)
- **sistemi di trattamento**, che rimuovono o agevolano la degradazione dei contaminanti presenti all'interno del deflusso superficiale

È possibile individuare un'ampia varietà di interventi che possono essere realizzati sia da soli che, preferibilmente, in combinazione fra loro, allo scopo di introdurre il drenaggio urbano sostenibile in qualsiasi area urbana, anche di piccole dimensioni. Bisogna infatti tenere in considerazione che gli spazi all'interno delle zone urbane sono spesso confinati e ristretti, soggetti a vincoli di pianificazione e progettazione solitamente più restrittivi rispetto alle altre aree. Anche se inizialmente può apparire una sfida, l'introduzione di interventi di drenaggio sostenibile è compatibile



(a) Tetto verde - Bishop Square, Londra (Fonte: Foster and Partners)



(b) Fascia filtrante - Hopwood (Fonte: Illman Young)

Figura 2.3: *Interventi di drenaggio urbano sostenibile: esempi*

con i diversi spazi urbani, senza impatti negativi sulla loro funzione principale.

Di seguito vengono quindi individuati i diversi interventi che possono essere realizzati nell'ambito della gestione sostenibile delle acque meteoriche.

Sistemi di raccolta della pioggia In questo ambito l'acqua piovana viene raccolta dal tetto di un edificio o da altre superfici pavimentate e convogliata all'interno di un serbatoio, che può essere collocato sia sopra che sotto il livello del suolo. L'acqua viene immagazzinata, trattata (dove richiesto) ed in seguito utilizzata come scorta per edifici privati, commerciali, industriali e pubblici. A seconda dell'utilizzo previsto, il sistema può includere componenti di trattamento delle acque.

Tetti verdi Sono interventi che richiedono l'inserimento di uno strato di suolo vegetato sul tetto di un edificio, allo scopo di realizzare una superficie "viva": l'acqua di pioggia viene immagazzinata all'interno del suddetto strato ed assorbita dalla vegetazione. Ne viene riportato un esempio in Figura 2.3(a).

Un'alternativa a questo intervento sono i tetti blu, che immagazzinano l'acqua a livello della copertura stessa, senza l'impiego della vegetazione.

Sistemi infiltranti Sono interventi che raccolgono ed immagazzinano il deflusso superficiale, consentendogli di infiltrarsi all'interno del suolo. In questo ambito è possibile proteggere la falda acquifera dal rischio di inquinamento adottando una configurazione che presenti uno strato di vegetazione che vada a ricoprire uno strato di terreno insaturo.

Fasce filtranti Sono interventi che consentono al deflusso superficiale che giunge da un'area impermeabile di fluire attraverso una zona inerbita o comunque densamente vegetata, allo scopo di promuovere i processi di sedimentazione e filtrazione. Ne viene riportato un esempio in Figura 2.3(b).

Fasce drenanti Sono interventi che vanno ad immagazzinare temporaneamente il deflusso superficiale sotto la superficie, in un canale poco profondo di sassi e ghiaia. Si vanno quindi a promuovere sul flusso i processi di attenuazione, convogliamento e trattamento (attraverso la filtrazione).

Fossi vegetati In questo ambito si richiede la presenza di un canale vegetato, utilizzato per convogliare e trattare il deflusso superficiale attraverso la filtrazione. Questa tipologia di inter-



(a) Fosso vegetato - Rednock School, Dursley (Fonte: Illman Young)



(b) Pavimentazione permeabile (Fonte: Interpave)

Figura 2.4: *Interventi di drenaggio urbano sostenibile: esempi*

vento si distingue in "umido", se il progetto prevede che l'acqua resti permanentemente alla base del canale, e "secco", se il progetto prevede che l'acqua sia presente nel canale soltanto dopo un evento di precipitazione. Ne viene riportato un esempio in Figura 2.4(a).

Pavimentazioni permeabili In questo ambito si consente al deflusso superficiale di penetrare all'interno della pavimentazione. A seconda della tipologia di quest'ultima, l'acqua può filtrare all'interno degli spazi tra i blocchi solidi che la compongono oppure attraverso il blocco stesso. Il flusso può essere immagazzinato sotto la pavimentazione e può essergli consentito di infiltrarsi all'interno del suolo. Ne viene riportato un esempio in Figura 2.4(b).

Aree di bioritenzione In questo ambito si richiede l'inserimento di una depressione poco profonda all'interno del paesaggio, che permetta al deflusso di stagnare temporaneamente sulla superficie, per poi filtrare attraverso la vegetazione ed i suoli sottostanti. In questa semplice configurazione viene spesso definita rain garden (vedasi esempio in Figura 2.5(a)). Il progetto può prevedere l'aggiunta di strati di ghiaia e sabbia e l'aumento della vegetazione allo scopo di migliorare il sistema di trattamento. Ne viene riportato un esempio in Figura 2.5(b).

Alberi Gli alberi possono essere inseriti in uno schema in cui siano già presenti sistemi d'infiltrazione allo scopo di migliorarne la performance, poiché la crescita delle radici ed i processi di decomposizione aumentano la capacità d'infiltrazione del suolo. In alternativa possono essere



(a) Rain Garden - Measham Leisure Centre, Measham (Fonte: Robert Bray Associates)



(b) Area di bioritenzione - Portland (Fonte: Illman Young)

Figura 2.5: *Interventi di drenaggio urbano sostenibile: esempi*



(a) Bacino di ritenzione, Dunfermline (Fonte: Abertay University)



(b) Stagno, Matchborough First School, Matchborough (Fonte: Robert Bray Associates)

Figura 2.6: *Interventi di drenaggio urbano sostenibile: esempi*

inseriti come elementi indipendenti all'interno di fossi scavati e riempiti di terreno, fioriere o suoli strutturali, raccogliendo, immagazzinando e trattando (attraverso filtrazione e fitodepurazione) il deflusso superficiale.

Serbatoi di attenuazione In questo ambito è possibile realizzare ampi spazi vuoti all'interno del suolo allo scopo di immagazzinare temporaneamente il deflusso superficiale, sottoponendolo in seguito a infiltrazione, rilascio controllato e utilizzo. Questa struttura di immagazzinamento è spesso costruita utilizzando sistemi geocellulari o altri sistemi modulari di immagazzinamento, serbatoi di cemento o tubi sovradimensionati.

Bacini di ritenzione/Vasche volano Sono interventi che richiedono che, durante un evento di precipitazione, il deflusso superficiale venga convogliato verso una depressione collocata nell'ambiente, in cui sia inserito uno sbocco che restringa il flusso: in questo modo il bacino si riempie ed effettua un processo di attenuazione. In genere i bacini sono asciutti, eccetto durante o immediatamente in seguito ad un evento di precipitazione. Se il bacino è vegetato, il flusso viene raccolto e filtrato attraverso la base del bacino: viene quindi effettuato un processo di trattamento. Ne viene riportato un esempio in Figura 2.6(a).

Stagni e aree di fitodepurazione Sono interventi in cui è presente uno stagno d'acqua permanente che può essere utilizzato per effettuare sia attenuazione che trattamento del deflusso superficiale e dove le fuoriuscite sono controllate. Questi interventi possono supportare vegetazione sia emergente che sommersa lungo la loro battigia e nelle zone poco profonde e paludose, che migliorano il processo di trattamento e la biodiversità dell'area. Ne viene riportato un esempio in Figura 2.6(b).

2.2.2 Benefici per l'ambiente e per l'uomo

L'approccio di drenaggio urbano sostenibile persegue l'obiettivo di raggiungere quattro categorie di benefici:

- supportare la gestione del rischio di inondazione e mantenere e proteggere il ciclo naturale dell'acqua (quantità dell'acqua)
- gestire la qualità del deflusso superficiale per prevenire fenomeni di inquinamento (qualità dell'acqua)
- realizzare e sostenere luoghi migliori in cui fauna e flora possano svilupparsi (biodiversità)

- realizzare e sostenere luoghi migliori in cui le persone possano vivere (amenità)

Si può quindi sinteticamente affermare che quantità dell'acqua, qualità dell'acqua, biodiversità e amenità possono essere considerati i quattro "pilastri" della progettazione di drenaggio urbano sostenibile.

Quantità dell'acqua L'approccio di drenaggio urbano sostenibile ha l'obiettivo di gestire la quantità d'acqua piovana che giunge al suolo, riducendo così la probabilità che si verifichino allagamenti all'interno dei territori urbanizzati. Questa tipologia di gestione fornisce l'opportunità unica di sfruttare l'acqua piovana come una risorsa all'interno delle aree urbane. Si tratta di un punto di vista diametralmente opposto rispetto a quello tradizionale, secondo cui le acque meteoriche rappresentavano un disturbo e un rifiuto da rimuovere il più in fretta possibile. Cogliendo l'opportunità di catturare ed immagazzinare il deflusso superficiale (in particolare dai tetti), una scorta d'acqua non potabile può essere utilizzata sia all'interno di un edificio, ad esempio per il risciacquo dei WC, sia all'esterno, ad esempio per l'irrigazione delle aree verdi (vedasi esempio in Figura 2.7).

L'approccio di drenaggio urbano sostenibile ha inoltre l'obiettivo di supportare la gestione del rischio di esondazione del corpo idrico recettore, mantenendone il flusso di base e riducendo il rischio di erosione delle sponde e del letto. In questo modo ne viene preservata la morfologia e l'ecologia. Risulta quindi necessario innanzitutto gestire l'acqua piovana vicino al punto in cui cade ed effettuare poi un controllo sulla portata di deflusso superficiale rilasciata dal sito, ponendo particolarmente attenzione al picco di quest'ultima. Dal momento che le opportunità per l'infiltrazione all'interno delle aree urbane sono spesso limitate, appare indispensabile effettuare degli interventi che permettano di controllare i volumi d'acqua piovana per eventi frequenti. Ne sono un esempio i sistemi di raccolta delle acque meteoriche, le zone di immagazzinamento rea-

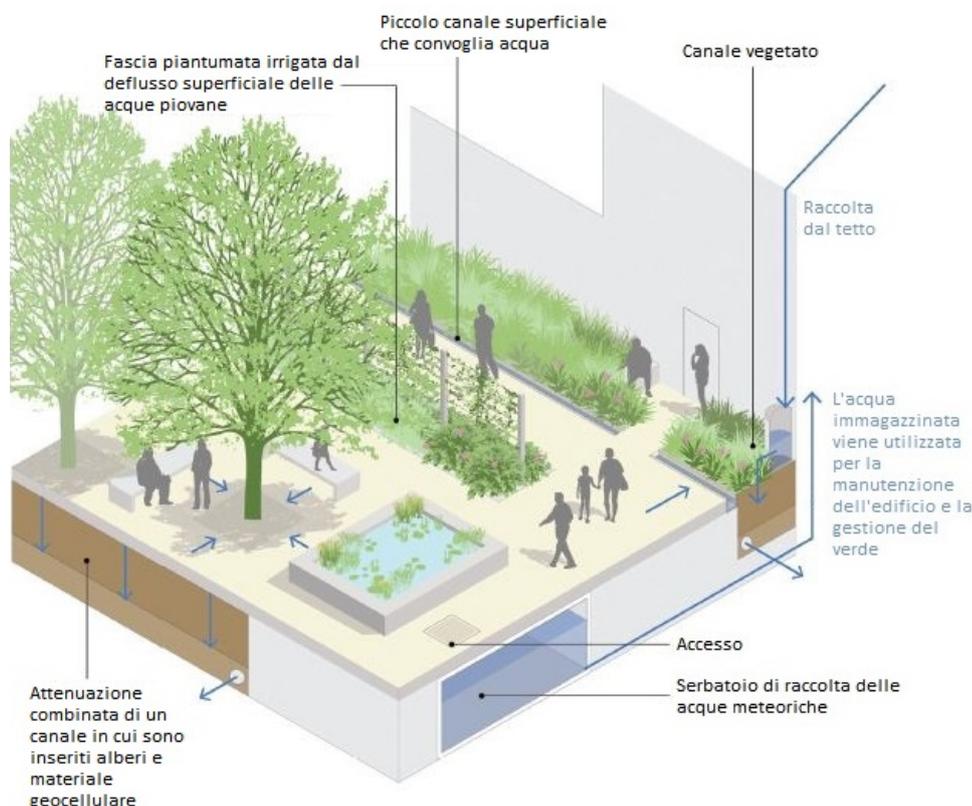


Figura 2.7: Esempio di spazio comune in cui il deflusso superficiale è utilizzato come una risorsa (Fonte: "The SuDS Manual", Woods Ballard et al.)

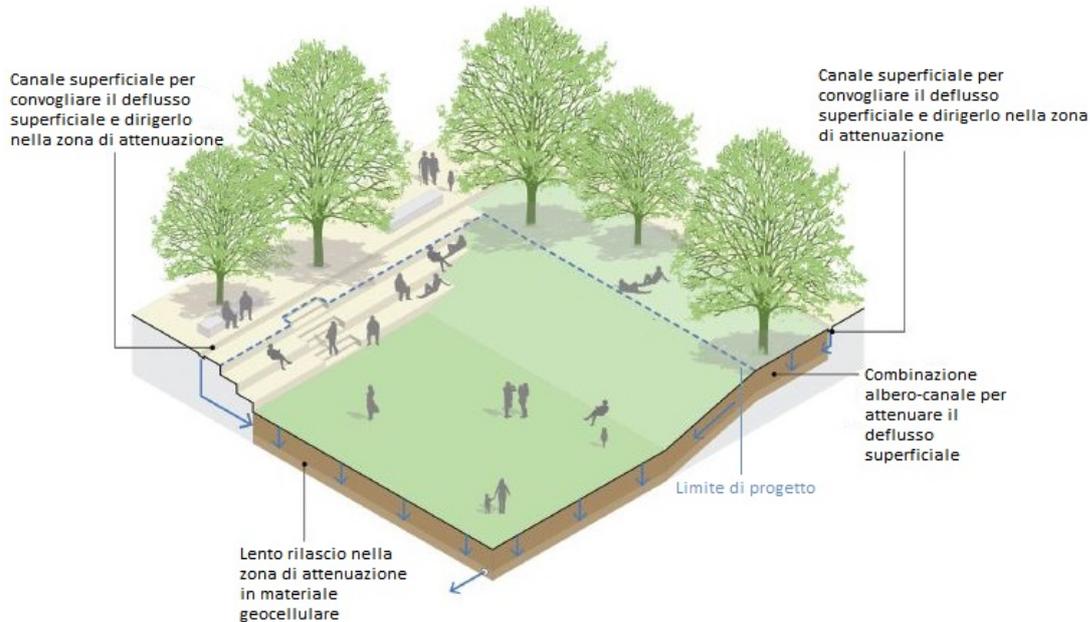


Figura 2.8: Esempio di spazio civico multi-funzionale (Fonte: "The SuDS Manual", Woods Ballard et al.)

lizzate in materiale ghiaioso (come le pavimentazioni permeabili) e gli interventi che favoriscono l'aumento del livello di umidità del suolo e, di conseguenza, il processo di evapotraspirazione (come i tetti verdi).

Inoltre l'approccio di drenaggio urbano sostenibile ha l'obiettivo di drenare efficacemente il sito, gestendo il rischio di sovraccarico del sistema fognario e conseguente allagamento dell'area. Il flusso eccedente (ovvero in eccesso rispetto al limite per cui il sistema è stato progettato) può essere gestito in sicurezza in uno spazio sopra il suolo, in modo tale che i rischi per le persone e le loro proprietà siano minimizzati. Nelle aree di ampiezza limitata è possibile dirigere il flusso all'esterno, ad esempio verso una strada. Infatti elementi quali zone di immagazzinamento e canali di convogliamento delle acque meteoriche in caso di eventi estremi possono essere inclusi all'interno di progetti di strade o parcheggi, sfruttando la presenza di cordoli rialzati o dossi artificiali come componenti di contenimento. Inoltre spazi civici, come parchi e piazze, possono essere progettati allo scopo di immagazzinare il flusso in eccesso (vedasi esempio in Figura 2.8).

Qualità dell'acqua L'approccio di drenaggio urbano sostenibile ha l'obiettivo di supportare la gestione della qualità dell'acqua del corpo idrico recettore e della falda acquifera. In particolare il deflusso superficiale proveniente dai tetti degli edifici e dalle zone pedonali all'interno delle aree urbane richiede trattamenti limitati. Al contrario, le superfici interessate dal passaggio dei veicoli necessitano l'impiego di sistemi di trattamento più efficienti, per minimizzare i rischi per l'ambiente. Il processo di trattamento è di norma realizzabile sfruttando suoli o sistemi di filtrazione ghiaiosi, come ad esempio pavimentazioni permeabili e aree di bioritenzione, o attraverso l'impiego di aree di convogliamento ed immagazzinamento piantumate.

Biodiversità L'approccio di drenaggio urbano sostenibile ha l'obiettivo di supportare e proteggere gli habitat e le specie naturali autoctone. Infatti il deflusso superficiale costituisce una risorsa non soltanto per l'uomo ma anche per l'ambiente: un regolare flusso d'acqua (se adeguatamente trattato) può aiutare a sostenere gli habitat che, in sua assenza, andrebbero a perdersi all'interno dell'ambiente urbano.

Inoltre l'approccio di drenaggio urbano sostenibile ha l'obiettivo di contribuire sia all'incremento della biodiversità locale, sia alla connettività tra i diversi habitat.

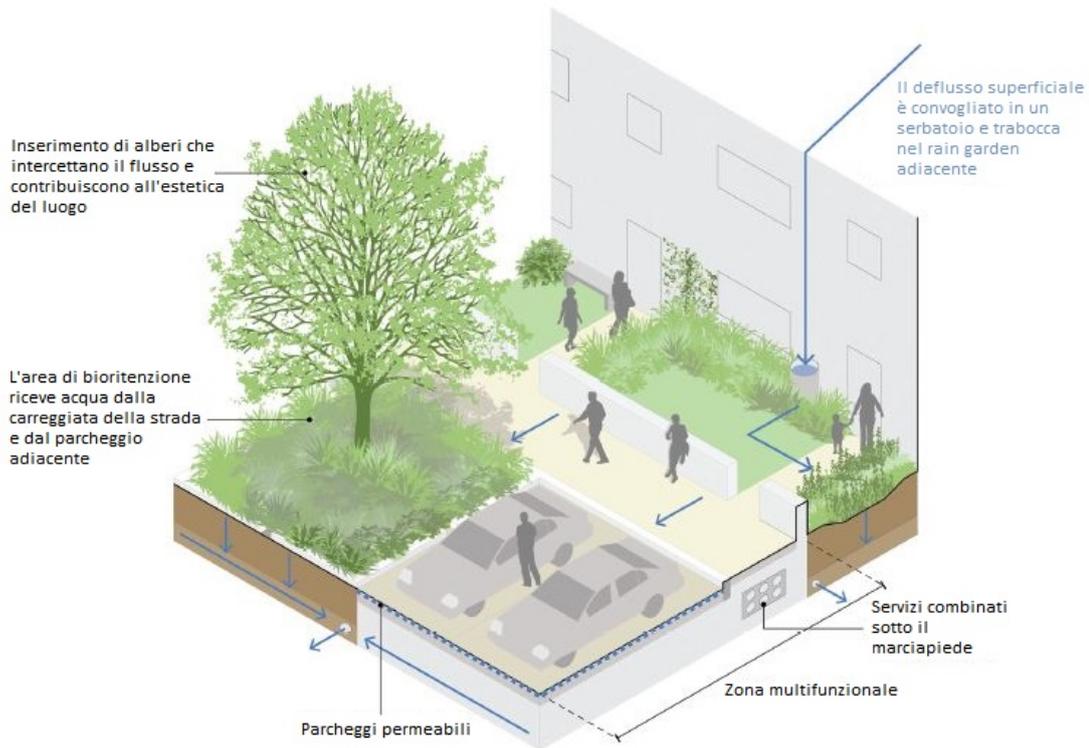


Figura 2.9: Esempio di sito urbano multi-funzionale (Fonte: "The SuDS Manual", Woods Ballard et al.)

Amenità L'approccio di drenaggio urbano sostenibile ha l'obiettivo di massimizzare la multifunzionalità del sito, andando a soddisfare esigenze anche contrastanti fra loro. Gli interventi all'interno delle aree urbanizzate devono essere considerati parallelamente alla necessità di infrastrutture verdi, al raggiungimento degli obiettivi di biodiversità e alla necessità di uno spazio ameno che possa supportare lo stile di vita delle persone. In particolare rain garden e aree di bioritenzione sono un eccellente esempio di interventi che possono essere integrati in un ampio range di componenti stradali, quali parcheggi su strada, marciapiedi, spazi per deposito di biciclette, stazioni di noleggio bici e aree di sosta dei pedoni (vedasi esempio in Figura 2.9). Inoltre gli interventi di drenaggio urbano sostenibile possono sia giocare un ruolo significativo nel migliorare le caratteristiche estetiche di un ambiente urbano, sia fornire sistemi di gestione sicura delle acque meteoriche.

2.2.3 Coinvolgimento della comunità

Gli interventi di drenaggio urbano sostenibile devono essere fortemente focalizzati sulle persone che usufruiranno dello spazio, fornendo loro l'opportunità di interagire reciprocamente e con l'ambiente esterno. Essi possono dare un contributo significativo per supportare il miglioramento delle aree urbane.

Vi è sempre stata una forte attrazione tra l'uomo e l'acqua all'interno dell'ambiente urbano, grazie alla bellezza che quest'ultima può aggiungere al paesaggio, al suo effetto rilassante e rinfrescante e al suo possibile utilizzo in ambito ricreativo. La presenza positiva dell'acqua all'interno delle aree urbane può promuovere un forte senso di appartenenza al luogo, creando spazi unici che possono essere fruiti da tutti. Le persone infatti preferiscono sentirsi appartenenti alla comunità locale, soprattutto se hanno l'opportunità di interagire con gli altri, grazie alla presenza di aree ricreative e luoghi di aggregazione. A sua volta questo fattore può portare numerosi benefici secondari, attirando nell'area attività commerciali, investimenti in interventi di riqualificazione, eventi pubblici e visitatori: ne consegue anche la possibilità di ridurre la criminalità.

Gli interventi di drenaggio urbano sostenibile devono quindi essere focalizzati, già dalla fase di progettazione, sulle esigenze e sulle opportunità per la comunità urbana. Gli spazi verdi, ad esempio, giocano un ruolo importante nel migliorare la salute ed il benessere delle persone, a cui possono contribuire grazie ad un miglioramento della qualità dell'aria, fornendo ombra e raffreddamento nell'ambiente urbano, oltre svolgere una parte fondamentale nelle strategie di gestione del rischio di allagamento. Connettere le infrastrutture verdi permette di inserire le zone pedonali e le piste ciclabili all'interno di uno spazio verde tranquillo e adatto alla ricreazione. Questi benefici a loro volta forniscono alle persone l'opportunità di interagire con la natura, diventare più attivi e vivere all'interno di un ambiente maggiormente attraente e stimolante: tutto ciò determina effetti positivi sulla salute e sul benessere.

Nel quadro appena delineato risulta necessario supportare l'apprendimento delle persone sui temi ambientali, al fine di migliorare la loro conoscenza sul metodo di gestione ed utilizzo del deflusso superficiale all'interno del contesto in cui vivono e sui benefici che derivano da un approccio sostenibile. In questo modo si va anche a massimizzare la leggibilità degli interventi di drenaggio urbano sostenibile che sono stati realizzati in sito.

2.2.4 Adattabilità al cambiamento climatico

Oltre ai benefici esposti ai paragrafi precedenti, l'approccio di drenaggio urbano sostenibile va a supportare la resilienza e l'adattabilità dell'area urbana ai futuri cambiamenti climatici. Infatti in un ambiente densamente urbanizzato, gli scenari di cambiamento climatico potranno determinare periodi di scarsità d'acqua, che sarà quindi soggetta a controlli più stringenti e costi maggiori. Grazie all'approccio sostenibile, sarà quindi possibile raccogliere ed immagazzinare il deflusso superficiale, mettendo a disposizione una scorta d'acqua.

Una parte vitale della strategia per rendere le città più resilienti ai futuri cambiamenti climatici e alla crescente urbanizzazione è rappresentata dal processo di retrofit (ammodernamento) che può essere attuato su di esse. Gli interventi di drenaggio sostenibile vanno a prevenire ogni possibile incremento nel rischio di allagamento all'interno delle nuove aree urbane mentre l'ammodernamento (e quindi l'inserimento di interventi di gestione sostenibile) vanno a ridurre il rischio già presente nelle aree urbane preesistenti. L'estensione e la tipologia di interventi che possono essere realizzati sono influenzati dalle specifiche caratteristiche del sito.

Considerando quindi l'applicazione pratica, inserire interventi di drenaggio sostenibile sulle strade urbane come un progetto a se stante potrebbe non apparire sempre economicamente vantaggioso. È spesso più semplice e redditizio inserire interventi di drenaggio urbano sostenibile come parte di altri lavori di miglioramento dell'area, quali ad esempio la costruzione di misure per moderare il traffico e la manutenzione (vedasi esempio in Figura 2.10).

Giardini o altre aree verdi sono l'ideale per applicare un processo di retrofit come parte di un generale lavoro di miglioramento.

La stessa considerazione vale anche per gli edifici: appare economicamente vantaggioso inserire interventi di drenaggio urbano sostenibile come parte di un programma più ampio di manutenzione, rinnovamento o ampliamento.

2.3 Esempi nel mondo

Dopo aver analizzato la filosofia del drenaggio urbano sostenibile ed i diversi interventi che possono essere realizzati, sono stati scelti alcuni esempi di applicazione di questo approccio. In particolare si è deciso di analizzare la Benthemplein Water Square a Rotterdam, il Tanner Springs Park a Portland e la Derbyshire Street a Londra, descritti nei paragrafi seguenti.

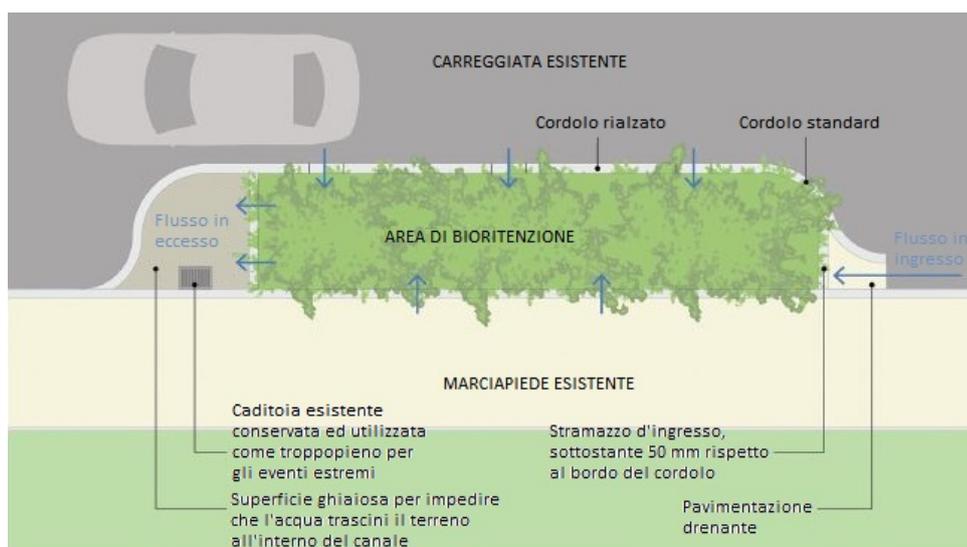


Figura 2.10: Esempio di area di bioritenzione inserita a monte di una caditoia esistente (Fonte: "The SuDS Manual", Woods Ballard et al.)

2.3.1 Benthemplein Water Square

Il primo esempio analizzato è la Water Square a Benthemplein, collocata nei pressi del centro della città di Rotterdam e progettata dallo studio De Urbanister (vedasi Figura 2.11). L'intervento è stato concepito allo scopo di gestire il crescente problema di allagamento urbano, andando a separare il deflusso superficiale dalla rete fognaria, in questo caso a sistema unitario. Si tratta di un'opera che combina lo stoccaggio dell'acqua con il miglioramento della qualità dello spazio pubblico, in una piazza urbana in precedenza sottoutilizzata.

La Water Square è costituita da tre bacini di ritenzione che, durante un evento di precipitazione, raccolgono e stoccano un deflusso superficiale di circa $1700 m^3$: due bacini, meno profondi, sono utilizzati durante tutti gli eventi di pioggia mentre il terzo bacino, più profondo, è utilizzato soltanto per eventi intensi. Il deflusso superficiale viene raccolto dall'area pavimentata della piazza e dalle zone circostanti, inclusi i tetti degli edifici attigui, e trasportato attraverso larghi canali di scolo di acciaio inossidabile all'interno dei bacini. I due bacini meno profondi consentono l'infiltrazione delle acque meteoriche, mentre il bacino più profondo provvede ad effettuare una laminazione del flusso, andando in seguito a scaricarlo all'interno di un canale vicino. Tutta l'acqua piovana che è stata raccolta all'interno dei bacini viene quindi allontanata dalla rete fognaria a sistema unitario. In questo modo si va ad alleviare il tradizionale sistema di drenaggio, abbassando la frequenza con cui esso raggiunge la condizione di sovraccarico e scarica il flusso all'interno dei corpi idrici recettori. Infatti separando gradualmente le acque meteoriche dalle



(a) Fonte: Pallesh + Arzfane



(b) Fonte: Urbanisten

Figura 2.11: Benthemplein Water Square

acque reflue con diversi interventi, si vuole raggiungere l'obiettivo di migliorare la qualità dei corpi idrici nella città.

La Water Square è stata progettata allo scopo di rappresentare un'area di gioco e riposo per la popolazione. Il bacino più profondo infatti presenta un campo sportivo in terra battuta, circondato da posti a sedere a gradinate. Inoltre i canali di scolo e uno dei bacini meno profondi sono progettati per essere adatti all'uso degli skater.

Allo scopo di migliorare l'estetica della piazza, sono state posizionate delle fioriere lungo le zone di transito dei pedoni e vicino alle aree dove le persone possono riposarsi e trarre beneficio dall'ambiente circostante. Le piante inserite sono state selezionate per fornire colori vivaci durante il periodo estivo e colori tenui durante quello invernale. Inoltre lo schema di colori adottato per le superfici della piazza presenta tonalità blu nelle zone dove l'acqua viene immagazzinata.

La comunità è stata strettamente coinvolta in tutte le fasi di sviluppo del progetto, indicando la necessità di trasformare la piazza in un luogo dinamico e piacevole di cui i giovani possano usufruire, uno spazio per giocare ed incontrarsi ed un'area piacevole e isolata dove l'acqua sia utilizzata in modo stimolante.

2.3.2 Tanner Springs Park

Il secondo esempio analizzato è il Tanner Springs Park nel distretto di Pearl, collocato all'interno della zona centrale della città di Portland (vedasi Figura 2.12). L'intervento è stato progettato dallo studio Atelier Dreiseiti e dalla società GreenWorks ed è stato concepito allo scopo di riqualificare un sito industriale, andando a realizzare uno spazio aperto di 4200 m^2 che potesse essere usufruito dalla popolazione e contemporaneamente effettuasse un'attività di ritenzione e trattamento del deflusso superficiale delle acque meteoriche.

In passato l'area era una zona umida, in seguito sostituita da cantieri ferroviari ed industrie che hanno contaminato il suolo, non consentendo più alcun processo di infiltrazione all'interno di esso. Il progetto attuato puntava quindi a ricollegarsi al passato dell'area, andando ad inserire all'interno del parco piante autoctone e piccoli ruscelli. L'opera ottenuta è andata ad inserirsi in uno dei tre parchi realizzati nel distretto Pearl.

L'acqua piovana che cade all'interno della linea di cordoli del parco va ad alimentare uno stagno con margini piantumati, attraversando una distesa di vegetazione autoctona e una zona umida, che effettuano un trattamento naturale sul flusso. Secondo lo schema messo in atto, l'area va a scaricare il flusso su Tanner Creek, un corso d'acqua che in passato scorreva attraverso il sito. Durante il tempo secco, l'acqua dello stagno va a circolare all'interno del parco, per mantenere attivo il sistema.

La parete est del parco è coperta da un'installazione artistica, realizzata riciclando i binari ferroviari storici recuperati dalla zona: vi è quindi un richiamo al passato industriale dell'area, che



(a) Fonte: Atelier Dreiseiti e GreenWorks



(b) Fonte: Atelier Dreiseiti e GreenWorks

Figura 2.12: *Tanner Springs Park*

sottolinea ulteriormente l'identità del luogo.

La partecipazione attiva della comunità e del gruppo direttivo delle parti interessate nel progetto ha aiutato nell'ideazione dell'intervento. Il parco viene inoltre mantenuto da un'associazione volontaria denominata "Friends of Tanner Springs".

2.3.3 Derbyshire Street

Il terzo esempio analizzato è la Derbyshire Street nella città di Londra, progettata dallo studio London Borough of Tower Hamlets (vedasi Figura 2.13). L'intervento è stato concepito allo scopo di riqualificare la parte finale (a est) di Derbyshire Street, che in precedenza era una strada senza uscita utilizzata soltanto come spazio per 12 parcheggi. Essendo una strada cieca, circondata da grandi alberi e recinzioni, essa era comunemente utilizzata per scaricare abusivamente rifiuti e per assumere comportamenti anti-sociali.

Il progetto del parco è stato sviluppato allo scopo di assumere una forte funzione sociale, con una pista ciclabile e un caffè all'aperto. Il cuore della filosofia progettuale era gestire il deflusso superficiale delle acque meteoriche attraverso il parco e, di conseguenza, ridurre il rischio di allagamenti locali. Sono quindi state adottate numerose tecniche di drenaggio urbano sostenibile, di seguito descritte.

Nel parco è presente un rain garden piantumato, che riceve il deflusso superficiale delle acque meteoriche dalle aree pavimentate che costeggiano la strada: l'intervento costituisce anche una barriera fisica tra la pista ciclabile e il caffè all'aperto.

Sono inoltre presenti delle fioriere all'interno delle quali sono stati deviati i pluviali dell'adiacente Oxford House: esse vanno a laminare e stoccare il flusso delle acque meteoriche. Nel momento in cui raggiungono la condizione di saturazione, vanno a scaricare il flusso in eccesso all'interno del rain garden.

È inoltre presente un fosso vegetato, che cattura il deflusso superficiale e raccoglie il flusso in eccesso dal rain garden: il carico d'acqua che riceve viene quindi assorbito all'interno del terreno. L'intervento costituisce anche una barriera fisica tra la pista ciclabile e gli appartamenti residenziali adiacenti.

Inoltre l'area occupata dal caffè all'aperto è stata realizzata con una pavimentazione permeabile, che consente l'infiltrazione all'interno del suolo.

Sono stati infine installati dei tetti verdi, che vanno ad intercettare ed attenuare il deflusso superficiale, attraendo inoltre uccelli, farfalle e api.

Grazie alle tecniche di drenaggio urbano sostenibile che sono state adottate, si è realizzata una situazione in cui le acque meteoriche vengono totalmente separate dalla rete fognaria, in questo caso a sistema unitario. Tutto viene gestito in sito, mitigando così il rischio di allagamenti locali causati dal deflusso superficiale, incoraggiando il drenaggio naturale e reintroducendo l'acqua all'interno del ciclo idrologico.



(a) Fonte: Greysmith Associates e London Borough of Tower Hamlets



(b) Fonte: Greysmith Associates e London Borough of Tower Hamlets

Figura 2.13: *Derbyshire Street*

Capitolo 3

Caso del Politecnico di Torino

Dopo aver analizzato la filosofia e le diverse tipologie di intervento che possono essere attuate nell'ambito del drenaggio urbano sostenibile (vedasi capitolo 2), si è deciso di applicare questo innovativo metodo di gestione delle acque meteoriche all'area del Politecnico di Torino.

Dal momento che quanto proposto all'interno del presente elaborato di tesi rappresenta un primo approccio alla tematica nell'ambito del Politecnico di Torino, si è scelto di agire sulle aree verdi già presenti, rendendole soggetti attivi nella gestione delle acque meteoriche. È stato quindi promosso un cambiamento di visione delle zone verdi, andando oltre la loro funzione puramente estetica ed attribuendogli un ruolo fondamentale nell'ambito del drenaggio urbano.

A livello pratico, si è quindi ipotizzato di convogliare una quota delle acque meteoriche che cadono sull'area dell'università verso una parte delle aree verdi presenti. Promuovendo il processo d'infiltrazione dell'acqua piovana all'interno di queste ultime, si è posto l'obiettivo di ridurre il carico che giunge all'interno della rete fognaria bianca e di effettuare un processo di trattamento. Allo scopo di realizzare quanto appena descritto, è stato necessario in primo luogo reperire informazioni inerenti sia all'uso del suolo che alla rete di drenaggio delle acque meteoriche nell'ambito del Politecnico di Torino. Sulla base dei dati acquisiti è stato possibile in secondo luogo selezionare le aree verdi più adatte all'obiettivo prefissato.

3.1 Raccolta dei dati

Il primo passo effettuato nell'ambito del presente elaborato di tesi è stato raccogliere le informazioni relative all'area su cui si sviluppa il Politecnico di Torino, esaminando in particolare due delle sedi di cui è composto: la Sede Centrale e la Cittadella.

A questo scopo è stato consultato il personale dell'Area Edilizia e Logistica (Edilog) dell'università, che ha fornito il seguente materiale:

- planimetria generale comprensiva di entrambe le sedi
- rilievo del sistema fognario (di tipo separato) relativo ad entrambe le sedi, sia della rete fognaria nera che di quella bianca

Facendo riferimento alla planimetria dell'università riportata in Figura 3.1, è possibile individuare la posizione delle due sedi, delimitate da una linea rossa. In particolare la Sede Centrale si estende da Corso Duca degli Abruzzi a Corso Castelfidardo, mentre la Cittadella si estende da Corso Castelfidardo a Via P. C. Boggio.

Nell'ambito del presente studio, l'attenzione è stata rivolta all'analisi dell'uso del suolo ed alla ricostruzione della rete di drenaggio delle acque meteoriche all'interno delle due sedi considerate. Le informazioni acquisite dall'Edilog sono state quindi opportunamente integrate effettuando dei sopralluoghi e verificando la corrispondenza tra quanto presente sulle mappe e quanto riscontrato nella realtà.



Figura 3.1: Planimetria della Sede centrale e della Cittadella del Politecnico di Torino. Si riportano in grigio gli edifici e in verde le aree verdi. Le due sedi sono delimitate da una linea rossa

Le considerazioni emerse dalle analisi compiute sono riportate al paragrafo 3.1.1 per la Sede Centrale e al paragrafo 3.1.2 per la Cittadella.

Uso del suolo Considerando in primo luogo l'uso del suolo, gli accertamenti effettuati sul campo hanno perseguito l'obiettivo di identificare le diverse tipologie di copertura presenti ed analizzarne la permeabilità alle acque meteoriche. In questa fase è stato indispensabile il contributo della planimetria generale, in base alla quale sono stati individuati i diversi elementi presenti nelle due sedi (quali edifici, parcheggi e zone verdi).

Riprendendo l'obiettivo del presente elaborato di tesi, sono state identificate innanzitutto le aree verdi presenti, analizzandone le caratteristiche principali. Esse rappresentano i punti fondamentali dell'analisi condotta e sono caratterizzate da un'elevata permeabilità alle acque meteoriche. Sono state inoltre analizzate le tipologie di copertura presenti sia sugli edifici, sia sulle altre superfici esterne, quali:

- aree di transito dei pedoni
- aree riservate allo studio o ad attività ricreative svolte dagli studenti e dal personale dell'università
- aree di transito dei veicoli
- aree di sosta o parcheggio dei veicoli

Rete di drenaggio delle acque meteoriche In secondo luogo, sulla base delle informazioni acquisite nel corso dell'analisi sull'uso del suolo, è stata ricostruita la rete di drenaggio delle acque meteoriche. In questa fase è stato necessario integrare la planimetria generale con il rilievo della rete fognaria bianca, allo scopo di ricostruire il percorso effettuato dall'acqua piovana che cade sull'area del Politecnico di Torino.

Basandosi sul materiale disponibile e sui sopralluoghi realizzati, è stato possibile individuare la

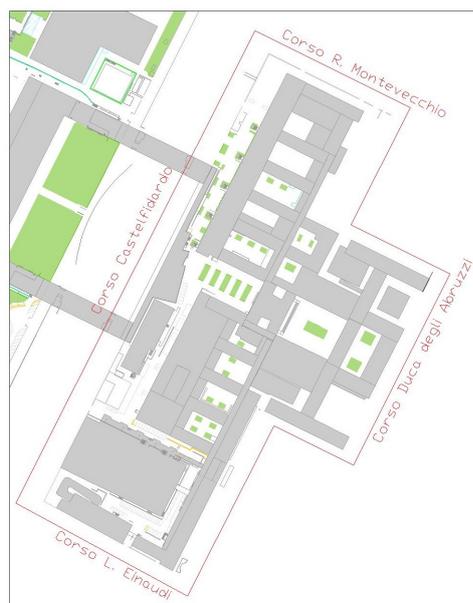


Figura 3.2: *Planimetria della Sede centrale del Politecnico di Torino. Si riportano in grigio gli edifici e in verde le aree verdi*

posizione delle caditoie, dei tombini e dei pluviali di una parte degli edifici. Combinando queste informazioni con l'analisi delle pendenze del terreno e con le informazioni relative all'uso del suolo, è stato possibile ricostruire i percorsi effettuati dalle acque meteoriche.

3.1.1 Sede Centrale

In primo luogo l'attenzione si è focalizzata sulla Sede Centrale che, riprendendo quanto indicato in precedenza, si estende da Corso Duca degli Abruzzi a Corso Castelfidardo.

Sulla base della planimetria generale e dei sopralluoghi effettuati, sono state analizzate le tipologie di copertura presenti nell'ambito della sede esaminata.

Da quanto si può constatare dalla planimetria riportata in Figura 3.2, è emersa innanzitutto la presenza di un ridotto numero di aree verdi. Oltre ad essere poco numerose, le zone verdi presenti corrispondono unicamente ad aiuole di modeste dimensioni, delle quali ne vengono riportati due esempi in Figura 3.3.

Per quanto concerne la tipologia di copertura degli edifici, è stata individuata la presenza sia di tetti a falde, tipicamente in tegole di argilla, sia di tetti piani, tipicamente in cemento. Entrambe le coperture impediscono all'acqua piovana di permeare, andando ad alimentare il deflusso



(a) Primo esempio



(b) Secondo esempio

Figura 3.3: *Esempi di aiuole presenti all'interno della Sede Centrale*

superficiale, che viene convogliato attraverso i pluviali all'interno della rete fognaria bianca. Considerando infine le altre superfici esterne, è stata identificata la presenza preponderante di pavimentazioni in sampietrini. Questi elementi lapidei sono irregolari e, di conseguenza, lasciano un discreto spazio fra loro, all'interno del quale l'acqua piovana può permeare: ne consegue un moderato effetto drenante. La quota di acqua di pioggia che non riesce a permeare viene quindi convogliata attraverso le caditoie all'interno della rete fognaria bianca.

Sulla base delle informazioni acquisite in relazione all'uso del suolo, l'attenzione si è focalizzata sulla ricostruzione della rete di drenaggio delle acque meteoriche. In questo frangente è però emerso un problema, legato al fatto che il rilievo della rete fognaria bianca per la Sede Centrale fornito dall'Edilog non è ancora stato ultimato e presenta numerose lacune. Le informazioni disponibili non sono state sufficienti per poter ricavare indicazioni precise sul percorso effettuato dall'acqua di pioggia all'interno della sede analizzata.

Si è quindi potuto concludere che la presenza di un ridotto numero di aree verdi, peraltro corrispondenti unicamente ad aiuole di modesta dimensione, e l'impossibilità di ricostruire la rete di drenaggio delle acque meteoriche non rendono la Sede Centrale adatta all'obiettivo prefissato. Si è quindi deciso di focalizzare l'attenzione sulla seconda sede del Politecnico di Torino presa in esame, la Cittadella.

3.1.2 Cittadella

In secondo luogo è stata analizzata la Cittadella che, riprendendo quanto detto in precedenza, si estende da Corso Castelfidardo a Via P. C. Boggio. La sede è stata realizzata allo scopo di ampliare la preesistente Sede Centrale, collocandosi in un processo di riqualificazione urbana di aree industriali dismesse.

Sulla base della planimetria generale e dei sopralluoghi effettuati, sono state analizzate le tipologie di copertura presenti nell'ambito della sede esaminata.

Da quanto si può constatare dalla planimetria riportata in Figura 3.4, è emersa innanzitutto la presenza di un maggior numero di aree verdi rispetto alla Sede Centrale, esaminata in precedenza. Le zone verdi presenti corrispondono sia ad aiuole, di modeste dimensioni, sia a prati, di ampiezza anche elevata: esse vanno a distribuirsi su tutta l'area della Cittadella. È inoltre



Figura 3.4: *Planimetria della Cittadella del Politecnico di Torino, con indicazioni sui percorsi effettuati dalle acque meteoriche. Si riportano in grigio gli edifici e in verde le aree verdi*



Figura 3.5: *Tetti verdi presenti nella Cittadella (Fonte: Google Maps)*

riscontrabile la presenza di tetti verdi, che garantiscono un ottimo effetto drenante per le acque meteoriche (vedasi Figura 3.5).

Per quanto concerne la tipologia di copertura degli altri edifici, è stata individuata la presenza sia di tetti a falde, tipicamente in metallo o tegole di argilla, sia di tetti piani, tipicamente in cemento. Entrambe le coperture impediscono all'acqua piovana di permeare, andando ad alimentare il deflusso superficiale, che viene convogliato attraverso i pluviali all'interno della rete fognaria bianca.

Considerando poi le altre superfici esterne, è stata identificata la presenza di diverse tipologie di pavimentazione. In primo luogo è stata individuata una copertura in asfalto, in particolare sulle aree di transito dei veicoli e su una porzione delle zone di parcheggio degli stessi. Questo tipo di copertura impedisce all'acqua piovana di permeare, andando ad alimentare il deflusso superficiale, che viene convogliato attraverso le caditoie all'interno della rete fognaria bianca.

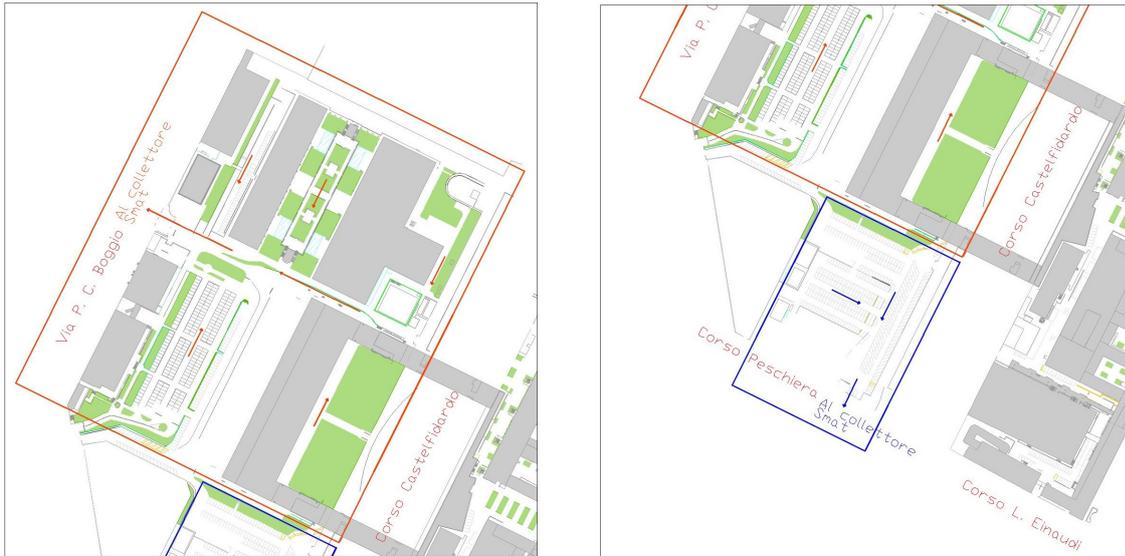
È stata inoltre identificata una pavimentazione in masselli autobloccanti, in corrispondenza della restante porzione delle zone di parcheggio dei veicoli e di una porzione delle aree di transito dei pedoni. Questo tipo di copertura presenta un esiguo spazio tra gli elementi lapidei, all'interno del quale l'acqua piovana può permeare: ne consegue un moderato effetto drenante per le acque meteoriche. La quota di acqua piovana che non riesce a permeare viene quindi convogliata attraverso le caditoie all'interno della rete fognaria bianca.

Infine è stata individuata una copertura in sampietrini, nella restante porzione delle zone di passaggio dei pedoni. Questi elementi lapidei sono irregolari e, di conseguenza, lasciano un discreto spazio fra loro, all'interno del quale l'acqua piovana può permeare: ne consegue un moderato effetto drenante. La quota di acqua di pioggia che non riesce a permeare viene quindi convogliata attraverso le caditoie all'interno della rete fognaria bianca.

Sulla base delle informazioni acquisite in relazione all'uso del suolo, l'attenzione si è focalizzata sulla ricostruzione della rete di drenaggio delle acque meteoriche. Nel caso della Cittadella non sono emerse le problematiche riscontrate per la Sede Centrale, essendo disponibile il rilievo della rete fognaria bianca. Sono però state individuate alcune incompletezze ma le informazioni fornite sono risultate sufficienti per poter condurre l'analisi della sede.

Sulla base del materiale disponibile e dei sopralluoghi realizzati, è stata individuata la posizione delle caditoie, dei tombini e dei pluviali della maggior parte degli edifici. Combinando queste informazioni con l'analisi delle pendenze del terreno e con le informazioni relative all'uso del suolo, è stato possibile ricostruire i percorsi effettuati dalle acque meteoriche. Da questo punto di vista è possibile dividere la Cittadella in due aree, rappresentate rispettivamente in Figura 3.6(a) e in Figura 3.6(b).

Si è potuto osservare che l'acqua di pioggia che cade sulla porzione della Cittadella delimitata dalla linea arancione (vedasi Figura 3.6(a)) segue i percorsi indicati dalle frecce arancioni più piccole, confluendo in un unico collettore centrale, rappresentato dalle linee arancioni più grandi. Quest'ultimo percorre la Cittadella da Corso Castelfidardo a Via Boggio, dirigendo il flusso verso



(a) Zona delimitata dalla linea arancione. Le frecce arancioni indicano le direzioni dei percorsi effettuati dalle acque meteoriche

(b) Zona delimitata dalla linea blu. Le frecce blu indicano le direzioni dei percorsi effettuati dalle acque meteoriche

Figura 3.6: Planimetria della Cittadella del Politecnico di Torino. Si riportano in grigio gli edifici e in verde le aree verdi

quest'ultima, al collettore gestito dalla Società Metropolitana Acque Torino (SMAT). Invece si è potuto osservare che l'acqua di pioggia che cade sulla porzione della Cittadella delimitata dalla linea blu (vedasi Figura 3.6(b)) segue i percorsi indicati dalle frecce blu, dirigendosi verso Corso Peschiera, al collettore gestito dalla SMAT.

3.2 Criteri di selezione delle aree verdi

Allo scopo di individuare i criteri di selezione delle aree verdi, risulta necessario chiarire i principali interventi che si ipotizza di realizzare e gli obiettivi che si intende raggiungere.

Lo scopo primario del seguente elaborato di tesi consiste nell'agire sulla portata d'acqua che, durante un evento di precipitazione, entra all'interno della rete fognaria bianca, andando a ridurne il carico. A questo proposito, si è ipotizzato di convogliare una quota delle acque meteoriche che raggiungono i tetti degli edifici o le altre superfici esterne verso le aree verdi adiacenti, sfruttando il processo di infiltrazione che si instaura all'interno di esse. Nel momento in cui le zone verdi non sono più in grado di trattenere tutta l'acqua piovana che ricevono, si avvia un processo di immissione di quest'ultima all'interno della rete fognaria bianca.

Prendendo in considerazione una singola area verde, devono essere effettuati degli interventi che indirizzino verso di essa le acque meteoriche che cadono sulle zone adiacenti. Un primo esempio in questo senso consiste nell'effettuare dei tagli nei cordoli che circondano l'area verde, per poter favorire l'ingresso dell'acqua di pioggia all'interno dell'area stessa, sfruttando la pendenza del suolo adiacente (vedasi esempio in Figura 3.7). Un secondo esempio consiste nel dirigere i pluviali degli edifici adiacenti la zona verde verso quest'ultima, allo scopo di intercettare l'acqua piovana che cade sul tetto degli edifici stessi.

Sulla base di quanto appena indicato, risulta chiaro che le aree verdi presenti all'interno del Politecnico di Torino sono state selezionate in base all'ampiezza propria e della potenziale superficie convogliata, oltre che per la disponibilità di informazioni precise sulla rete fognaria bianca.

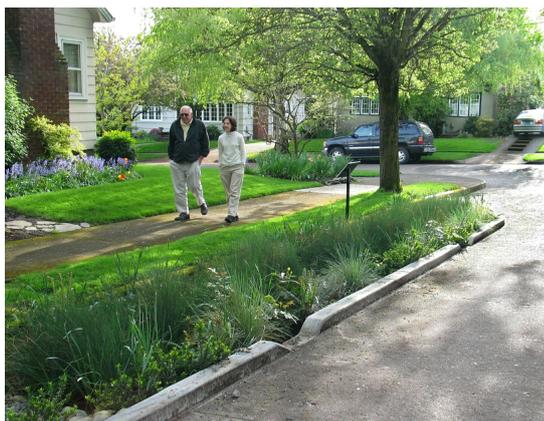


Figura 3.7: Esempio di taglio nei cordoli per favorire il convogliamento delle acque meteoriche all'interno dell'area verde (Fonte: "Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas", Huber J.)

3.3 Aree verdi scelte

Sulla base dei criteri di selezione indicati al paragrafo precedente, è stato possibile analizzare le aree verdi presenti all'interno del Politecnico di Torino ed individuare le più adatte allo scopo che si intende raggiungere.

In particolare dall'analisi condotta sulla Sede Centrale (vedasi paragrafo 3.1.1), si sono potute constatare sia la presenza di un ridotto numero di aree verdi, peraltro corrispondenti unicamente ad aiuole di modesta dimensione, sia l'impossibilità di ricostruire la rete di drenaggio delle acque meteoriche. Questi due fattori hanno contribuito a rendere la sede inadatta rispetto criteri precedentemente indicati.

Si è quindi deciso di focalizzare l'attenzione sulla Cittadella, per la quale queste problematiche non sono emerse (vedasi paragrafo 3.1.2) e che quindi si è rivelata idonea rispetto ai criteri avanzati. Sono state individuate all'interno della sede le aree verdi su cui agire al fine di gestire in modo sostenibile le acque di pioggia: in particolare sono state selezionate tre zone verdi, corrispondenti a prati sufficientemente ampi per poter incidere sul carico delle acque meteoriche. Le aree verdi scelte sono riportate in Figura 3.8, delimitate da una linea rossa e designate dalle lettere A, B, C e D: si faccia riferimento rispettivamente ai capitoli 5, 6, 7 e 8 per le analisi che sono state condotte su di esse.

In questo frangente è necessario far presente che con la lettera C sono state indicate due zone verdi di cui il Politecnico di Torino non si occupa. Le aree verdi considerate sono infatti gestite dalla General Motors, che ha collocato la propria sede vicino ad esse. Data la loro notevole estensione è sembrato però opportuno prenderle in analisi, effettuando delle ipotesi di intervento anche su di esse.

Nell'ambito del presente elaborato di tesi, sono state proposte tre configurazioni per ogni singola area verde, al fine di massimizzarne gli effetti sulle acque meteoriche. In primo luogo si è potuto constatare che la zona verde può esercitare un effetto di laminazione, legato alla sua capacità nell'abbattere il picco della portata di acqua piovana che riceve in ingresso. Inoltre si è potuto appurare che l'area verde può anche esercitare un effetto di trattamento, legato alla sua capacità di depurare le acque meteoriche in ingresso, mediante il processo di infiltrazione a cui queste ultime sono soggette.

Riprendendo quanto indicato in precedenza, sono quindi state proposte tre configurazioni, ipotizzando di:

- mantenere il preesistente terreno da giardino (vedasi paragrafo 3.3.1)
- sostituire il terreno da giardino con un terreno ghiaioso (vedasi paragrafo 3.3.2)

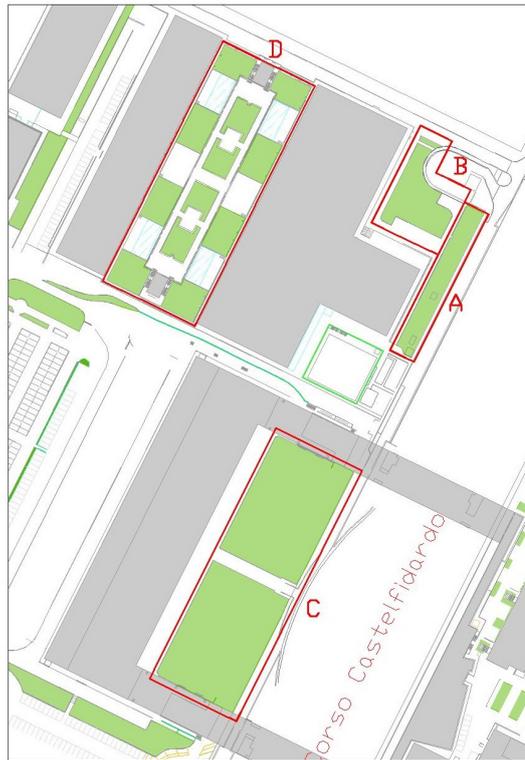


Figura 3.8: Planimetria della Cittadella del Politecnico di Torino. Si riportano in grigio gli edifici e in verde le aree verdi. Le aree verdi scelte sono delimitate da una linea rossa e designate con le lettere A, B, C e D

- inserire uno strato di materiale alveolare al di sotto di uno strato di terreno da giardino (vedasi paragrafo 3.3.3)

Le tre configurazioni presentate agiscono in modo differente sui due effetti precedentemente citati.

3.3.1 Prima configurazione proposta

La prima configurazione proposta non prevede la realizzazione di modifiche sull'area verde, mantenendo quindi il terreno da giardino preesistente. In questo frangente quindi non sono richiesti ulteriori interventi rispetto a quelli finalizzati al convogliamento delle acque meteoriche.

In Figura 3.9 viene riportato uno schema della configurazione proposta.

Le acque di pioggia subiscono prevalentemente l'effetto di trattamento, dovuto al processo di infiltrazione all'interno del terreno da giardino a cui sono soggette. Dall'altra parte esse subiscono

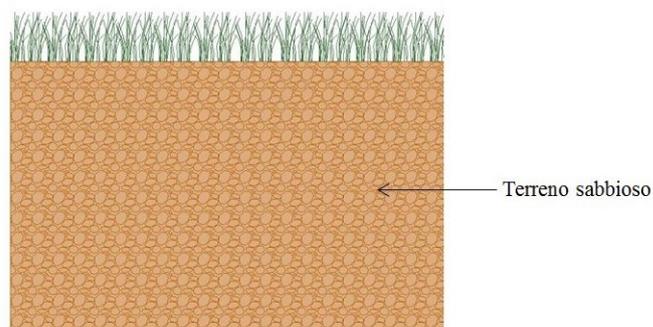


Figura 3.9: Schema della prima configurazione proposta: terreno sabbioso

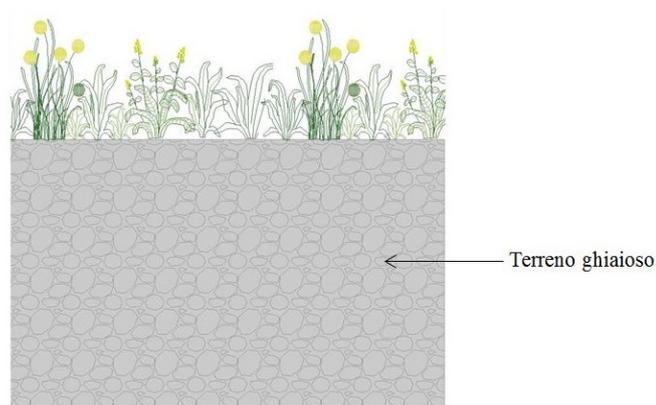


Figura 3.10: *Schema della seconda configurazione proposta: terreno ghiaioso*

in minor parte l'effetto di laminazione, poiché la configurazione proposta non riesce ad incidere in modo significativo sul picco della portata di acqua piovana che entra all'interno dell'area verde. In questo caso la vegetazione a prato, soggetta all'ingresso di un consistente carico di acqua piovana, deve essere periodicamente soggetta a manutenzione. Dall'altra parte essa è liberamente fruibile dalle persone.

3.3.2 Seconda configurazione proposta

Allo scopo di migliorare le prestazioni dell'area verde nel ridurre la portata di acqua di pioggia in ingresso, si è fatto riferimento alle tipologie di intervento che possono essere attuate nell'ambito del drenaggio urbano sostenibile, esaminate al paragrafo 2.2.1. In particolare si è preso spunto dalle aree di bioritenzione, ipotizzando di sostituire il terreno da giardino con un terreno ghiaioso, all'interno del quale sia presente una minima quota di sabbia e materiale alveolare, al fine di creare un ambiente favorevole alla crescita della vegetazione.

In Figura 3.10 viene riportata uno schema della configurazione proposta.

Rispetto alla prima configurazione presentata, si verifica un aumento dell'effetto di trattamento sulle acque meteoriche, dovuto al processo di infiltrazione all'interno del terreno ghiaioso. Inoltre aumenta anche l'effetto di laminazione, poiché la configurazione in esame riesce ad incidere in modo significativo sul picco della portata di acqua piovana che entra all'interno dell'area verde. In questo caso non è possibile mantenere una vegetazione a prato, per la crescita della quale un terreno ghiaioso non risulta adatto. È necessario invece inserire piante di diversa tipologia, quali quelle riportate in Figura 3.11.

Dal momento che si tratta di una vegetazione a fusto più alto rispetto ad un prato, è necessario realizzare dei sentieri tra le piante affinché l'area verde sia fruibile dalle persone.

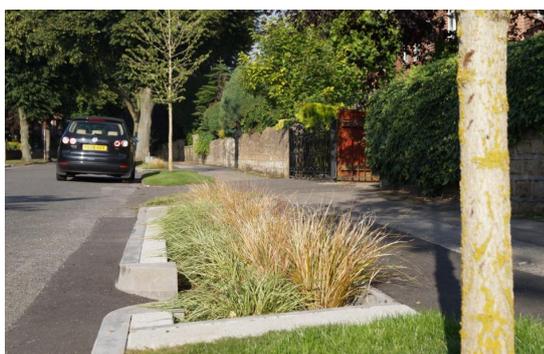


Figura 3.11: *Vegetazione adatta ad un terreno ghiaioso*

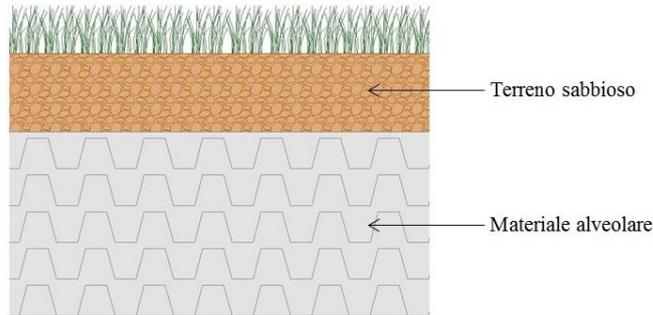


Figura 3.12: Schema della terza configurazione proposta: strato di terreno da giardino sovrastante uno strato di materiale alveolare

3.3.3 Terza configurazione proposta

Allo scopo di migliorare le prestazioni dell'area verde nel ridurre la portata di acqua di pioggia in ingresso, si è fatto nuovamente riferimento alle tipologie di intervento che possono essere attuate nell'ambito del drenaggio urbano sostenibile, esaminate al paragrafo 2.2.1. In particolare si è preso spunto dai tetti verdi, ipotizzando di inserire uno strato di materiale alveolare al di sotto di un terreno da giardino. Il materiale alveolare presenta uno spazio sufficiente da poter catturare una quota consistente delle acque meteoriche in arrivo.

In Figura 3.12 viene riportato uno schema della configurazione proposta.

Rispetto alla prima configurazione presentata si verifica una diminuzione dell'effetto di trattamento sulle acque meteoriche, a causa della riduzione dello spessore del terreno da giardino. Dall'altra parte l'effetto di laminazione si mantiene inalterato, poiché la configurazione in esame non riesce ad incidere in modo significativo sul picco della portata di acqua piovana che entra all'interno dell'area verde.

Lo spessore del terreno da giardino deve rispettare un range da 15 a 25 cm [9], affinché possa essere mantenuto un tappeto erboso.

La configurazione proposta risulta adatta a sostenere la crescita di una vegetazione a prato, che può essere fruibile dalle persone solo dopo la realizzazione di interventi di rinforzo. Infatti affinché la configurazione sia in grado di reggere il peso delle persone, è indispensabile ingabbiare il materiale alveolare in una struttura in calcestruzzo.

Capitolo 4

Schema di analisi di un'area verde

In riferimento a quanto indicato al capitolo 3, l'obiettivo del presente elaborato di tesi consiste nello sfruttare il processo di infiltrazione all'interno di un'area verde, allo scopo di ridurre e trattare la portata di acqua piovana che giunge nel sistema fognario. Risulta quindi fondamentale esporre lo schema di analisi adottato per affrontare il problema in esame, applicabile ad una qualsiasi area verde. In particolare nell'ambito del presente elaborato di tesi, l'approccio delineato è stato applicato alle aree verdi scelte all'interno del Politecnico di Torino.

A livello generale lo schema di analisi prevede di esaminare le caratteristiche principali dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche e modellare sia l'andamento delle precipitazioni sulla zona considerata, sia il processo di infiltrazione dell'acqua piovana all'interno della superficie verde.

4.1 Caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche

In primo luogo è necessario analizzare in modo approfondito l'area verde, focalizzandosi sulle caratteristiche che risultano fondamentali per poter esaminare il processo di infiltrazione di acqua piovana al suo interno. In questo ambito i primi parametri da analizzare sono l'ampiezza (A_{verde}), la porosità (ϕ), il grado di saturazione iniziale (s_0) e lo spessore (S) dell'area verde.

Ad eccezione dell'ampiezza della zona verde, tutti i parametri citati possono essere in primo luogo stimati utilizzando valori pubblicati in letteratura, sulla base della tipologia di area verde in esame. In seguito possono essere quantificati accuratamente attraverso dati di campo.

Ampiezza L'ampiezza della zona verde viene stimata sulla base della planimetria dell'area esaminata, della quale è necessario disporre. Questo parametro è in primo luogo indispensabile per valutare il volume dei pori presenti nell'area verde, dando un'indicazione della capacità di immagazzinamento di acqua piovana dell'area stessa. Inoltre l'ampiezza della zona verde è indicativa dell'estensione su cui cade la precipitazione e su cui si può allargare l'acqua nel caso in cui si verifichi un accumulo.

Porosità La porosità definisce il volume dei pori presenti nell'area verde ed è quantificabile dall'espressione:

$$\phi = \frac{V_{pori}}{V_{tot}} \quad (4.1)$$

Nell'equazione (4.1) V_{pori} rappresenta il volume dei pori e V_{tot} il volume totale dell'area verde, pari al prodotto tra l'ampiezza e lo spessore.

Il valore assunto dalla porosità dipende dalla forma e della dimensione dei grani costituenti il mezzo, dalla disposizione con cui i grani si sono accumulati, dalla pressione litostatica esercitata

su di essi e dalla composizione mineralogica. Per i suoli, il parametro presenta valori tipicamente compresi tra 0 e 48 %:

$$0 \leq \phi \leq 0.48$$

Grado di saturazione iniziale Il grado di saturazione definisce il volume d'acqua che va ad occupare lo spazio presente tra i diversi grani solidi dell'area verde ed è quantificabile dall'espressione:

$$s = \frac{V_{acqua}}{V_{pori}} \quad (4.2)$$

Nell'equazione (4.2) V_{acqua} rappresenta il volume dell'acqua presente e V_{pori} il volume dei pori. La zona verde presenta un grado di saturazione iniziale compreso tra 0 (pori occupati unicamente da aria) e 1 (pori completamente occupati dal fluido):

$$0 < s_0 < 1$$

Gli estremi dell'intervallo entro cui varia il parametro rappresentano rispettivamente la condizione di terreno secco e la condizione di terreno saturo. In questo frangente si considera una situazione in cui è presente una quota di acqua all'interno dei pori dell'area verde, che però non ha raggiunto la condizione di saturazione. Infatti il grado di saturazione iniziale si riferisce al periodo antecedente un evento di pioggia, in cui l'area verde è insatura.

Spessore Lo spessore dell'area verde rappresenta un parametro indispensabile per valutare il volume dei pori presenti nell'area verde.

Capacità d'infiltrazione Oltre alle caratteristiche dell'area verde appena descritte, risulta basilare quantificare anche la capacità d'infiltrazione della zona stessa. In questo frangente sono stati utilizzati diversi approcci, che richiedono la definizione di parametri stimabili in primo luogo da ricerche in letteratura. Anche in questo caso essi possono essere quantificati accuratamente attraverso dati di campo. Ulteriori approfondimenti in relazione ai parametri necessari in questo ambito sono riportate al paragrafo 4.3.

Dopo aver analizzato le caratteristiche dell'area verde, è necessario esaminare in modo approfondito il sistema di convogliamento delle acque meteoriche relativo alla zona stessa. Devono essere studiate le aree adiacenti la superficie verde, individuando quelle su cui cade l'acqua di pioggia che può essere indirizzata verso la zona stessa: ne viene raffigurato un esempio in Figura 4.1. In questo frangente, possono essere proposti degli interventi da effettuare sul luogo per aumentare l'ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}). Un primo esempio in questo senso consiste nell'effettuare dei tagli nei cordoli che circondano l'area verde, per poter favorire l'ingresso dell'acqua di pioggia all'interno dell'area stessa, sfruttando la pendenza del suolo adiacente (vedasi la freccia rossa in Figura 4.1). Un secondo esempio consiste nel dirigere i pluviali degli edifici adiacenti la zona verde verso quest'ultima, allo scopo di intercettare l'acqua piovana che cade sul tetto degli edifici stessi (vedasi la freccia blu in Figura 4.1).

In questa fase risulta fondamentale far riferimento alla planimetria della zona analizzata, a cui deve essere aggiunta quella della rete fognaria bianca, necessaria per delineare il percorso effettuato dalle acque meteoriche. In questo frangente è anche opportuno che la planimetria sia corredata di punti quotati, essenziali nell'ottica di analizzare la pendenza delle zone adiacenti l'area verde.

Sulla base del materiale appena descritto, è possibile delineare il sistema di convogliamento delle acque meteoriche. Analizzando infatti la pendenza del terreno e la posizione dei pluviali degli edifici adiacenti la zona verde, si vanno ad individuare le aree su cui cade l'acqua di pioggia che può essere convogliata verso la zona stessa.

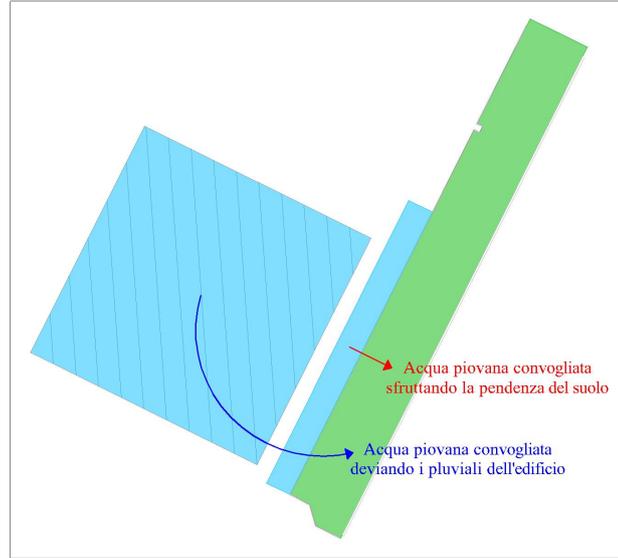


Figura 4.1: Esempio di area convogliata. Si riportano in azzurro l'area convogliata, in verde la superficie verde, in tratteggiato grigio gli edifici e in linea rossa le direzioni lungo cui l'acqua piovana viene convogliata all'interno dell'area verde

Delineato il sistema di convogliamento delle acque meteoriche, è possibile individuarne il rispettivo tempo di corrivazione (t_c). A livello generale, il tempo di corrivazione relativo ad un punto assegnato del sistema di convogliamento, assimilabile ad un bacino, rappresenta il tempo che impiega una goccia d'acqua che parte da quel punto per raggiungere l'area verde, assimilabile alla sezione di chiusura del bacino. Ad ogni punto appartenente al sistema di convogliamento corrisponde un particolare valore del tempo di corrivazione. Un punto particolare è quello idraulicamente più lontano dall'area verde, il cui tempo di corrivazione presenta il valore maggiore e coincide con il tempo di corrivazione dell'intero sistema di convogliamento. Questo parametro può essere calcolato grazie all'espressione:

$$t_c = t_{ir} + v_{pr} \cdot L_{pr} \quad (4.3)$$

Nell'equazione (4.3) t_{ir} rappresenta il tempo di ingresso dell'acqua piovana nella rete di convogliamento, v_{pr} la velocità con cui l'acqua piovana percorre la rete e L_{pr} la lunghezza del percorso effettuato dalla goccia che cade sull'area convogliata nel punto più lontano dall'area verde. Quest'ultimo parametro rappresenta quindi la lunghezza del percorso di corrivazione ed è misurabile sulla base della planimetria a disposizione: in Figura 4.2 ne viene riportato un esempio.

4.2 Modellazione delle precipitazioni

Allo scopo di modellare le precipitazioni che interessano l'area verde, risulta necessario ricostruire le curve di probabilità pluviometrica relative all'area dove si colloca la zona verde.

Le curve di probabilità pluviometrica correlano l'altezza di pioggia (h_p) con il tempo di precipitazione (t) per diversi tempi di ritorno (T) e possono essere espresse, con buona approssimazione, dalla relazione:

$$h_p(t, T) = a \cdot t^n \quad (4.4)$$

Nell'equazione (4.4) i parametri a e n sono rispettivamente il coefficiente pluviometrico orario, che rappresenta l'altezza di pioggia caduta in un intervallo di tempo pari a un'ora, e l'esponente di invarianza di scala, che governa l'andamento della curva e l'entità della dipendenza dal tempo della precipitazione. L'altezza di pioggia è espressa in mm mentre il tempo in h .

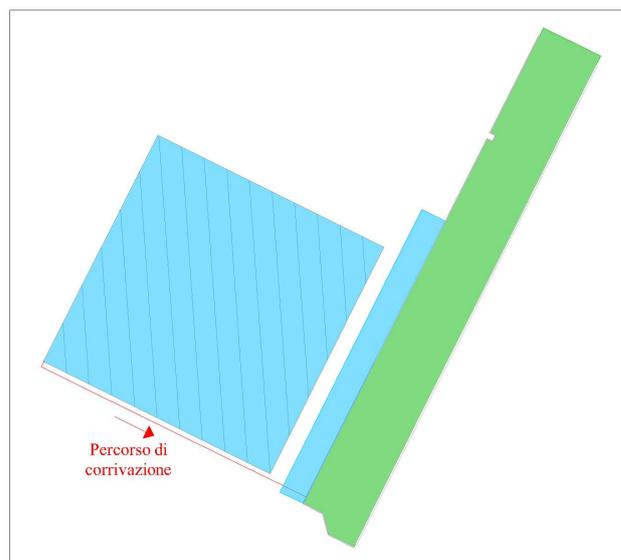


Figura 4.2: Esempio di percorso di corrivazione. Si riportano in azzurro l'area convogliata, in verde la superficie verde, in tratteggio grigio gli edifici e in linea rossa il percorso di corrivazione

Determinate le altezze di precipitazione per diverse durate, a parità di tempo di ritorno, è possibile ricostruire la curva di probabilità pluviometrica interpolando i dati con una linea polinomiale di primo grado. L'andamento che ci si attende per la curva è presentato in Figura 4.3: essa parte dal valore nullo, andando progressivamente a crescere all'aumentare del tempo di precipitazione. In particolare è possibile constatare che, all'aumentare del tempo di ritorno, la curva si sposta verso l'alto, come indicato dalla freccia in Figura 4.3.

4.3 Modellazione del processo di infiltrazione

Allo scopo di esaminare il processo di infiltrazione di una portata di acqua di pioggia all'interno dell'area verde, è stato necessario elaborare un modello matematico, successivamente tradotto in un programma mediante il software *MATLAB*. Introducendo i parametri quantificati ai paragrafi 4.1 e 4.2, il programma elaborato può essere applicato all'area verde oggetto di studio.

Il problema in esame è stato schematizzato considerando la zona verde come una vasca contenente un mezzo poroso: essa viene studiata supponendo che l'evento di precipitazione sia continuo per tutto il tempo dell'analisi e che l'acqua si distribuisca sull'intera superficie verde. Facendo riferimento alla Figura 4.4, si può osservare che la superficie verde riceve una portata in ingresso (Q_i), data dalla somma di due contributi:

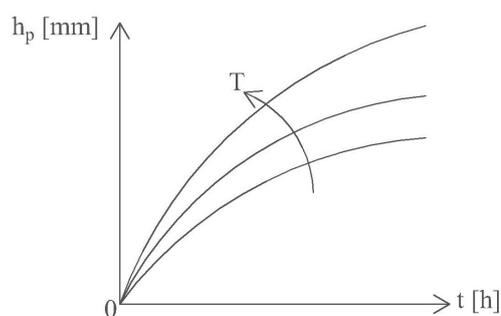


Figura 4.3: Andamento dell'altezza di pioggia nel tempo, al variare del periodo di ritorno T . La freccia indica che, all'aumentare del periodo di ritorno, la curva $h_p(t)$ si sposta verso l'alto

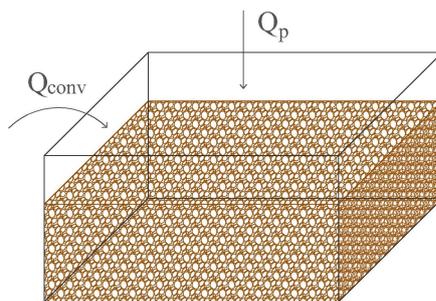


Figura 4.4: Schematizzazione del problema in esame. Si indica con Q_p la portata di pioggia e con Q_{conv} la portata convogliata

- una quota derivante dalla pioggia che cade direttamente sulla superficie verde, denominata "portata di pioggia" (Q_p)
- una quota derivante dal convogliamento della pioggia che cade sulle zone circostanti la superficie verde, denominata "portata convogliata" (Q_{conv})

Per quanto concerne il secondo contributo, il flusso in ingresso viene alimentato sia sfruttando la pendenza delle aree adiacenti sia direzionando all'interno della zona verde i pluviali degli edifici attigui (vedasi paragrafo 4.1).

Quanto appena descritto viene rappresentato dalla seguente espressione:

$$Q_i = Q_p + Q_{conv} \quad (4.5)$$

Nell'equazione (4.5) le portate sono espresse in m^3/h : per poter quantificare i due addendi è necessario far riferimento alle curve di probabilità pluviometrica introdotte al paragrafo 4.2, che rappresentano l'andamento dell'altezza di precipitazione (h_p) in funzione del tempo (t).

A partire dall'altezza di pioggia è possibile quantificare l'intensità di pioggia (i_p), espressa in mm/h , grazie all'equazione:

$$i_p(t) = \frac{h_p(t)}{t} = a \cdot t^{n-1} \quad (4.6)$$

Allo scopo di utilizzare quest'ultima variabile per calcolare i successivi parametri, risulta necessario effettuare una conversione da mm/h a m/h . L'andamento che ci si attende per l'intensità di pioggia viene presentato in Figura 4.5: essa parte da un valore tendente ad infinito, andando progressivamente a diminuire all'aumentare del tempo di precipitazione e avvicinandosi asintoticamente al valore nullo. L'intensità di pioggia risulta indispensabile per poter determinare la portata in ingresso (vedasi equazione (4.5)).

Infatti la portata di pioggia, il primo dei due contributi della portata in ingresso, può essere

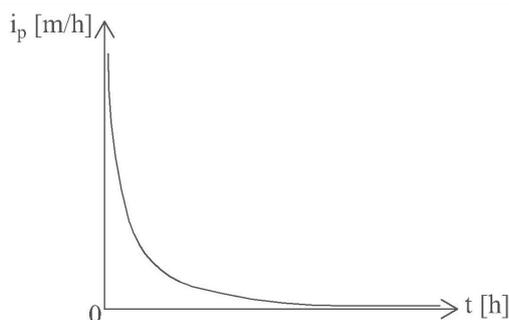


Figura 4.5: Andamento dell'intensità di pioggia nel tempo

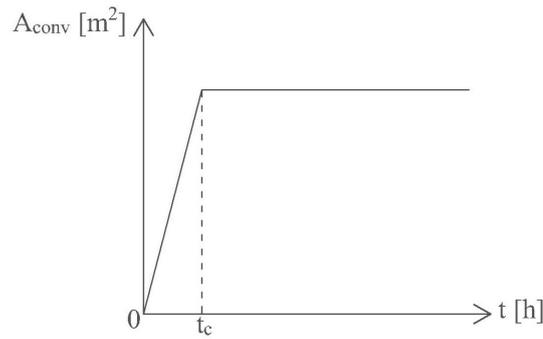


Figura 4.6: Andamento dell'ampiezza dell'area convogliata nel tempo

calcolata come:

$$Q_p(t) = i_p(t) \cdot A_{verde} \quad (4.7)$$

Nell'equazione (4.7) A_{verde} rappresenta l'ampiezza della superficie verde in esame ed è espressa in m^2 .

Per poter calcolare invece la portata convogliata, il secondo dei due contributi della portata in ingresso, è possibile utilizzare la seguente espressione:

$$Q_{conv}(t) = i_p(t) \cdot A_{conv}(t) \quad (4.8)$$

Nell'equazione (4.8) A_{conv} rappresenta l'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la superficie verde, espressa in m^2 e variabile in funzione del tempo di precipitazione. Essa si estende progressivamente a zone più lontane dal sistema in esame, assumendo la massima ampiezza in corrispondenza del tempo di corrivazione (t_c) relativo al sistema stesso e mantenendosi quindi costante per la restante durata della precipitazione (vedasi Figura 4.6).

In Figura 4.7 viene invece raffigurato un esempio di evoluzione spaziale dell'area convogliata verso la zona verde. All'aumentare del tempo di precipitazione vengono coinvolte aree sempre più distanti, rappresentate con colori che vanno dall'azzurro (le aree convogliate al tempo iniziale,

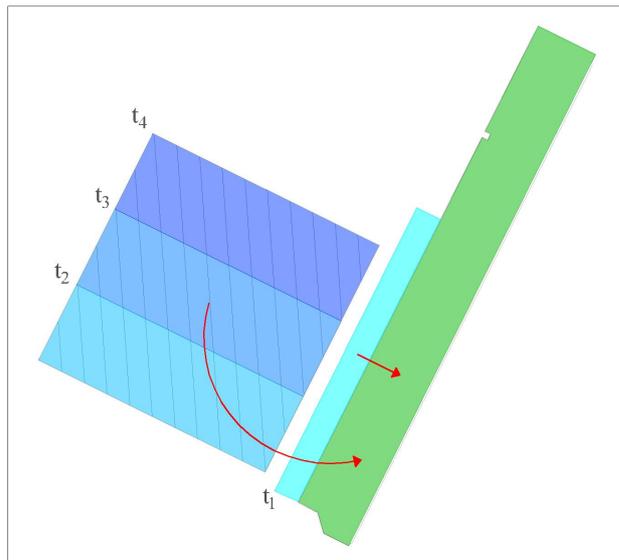


Figura 4.7: Esempio di evoluzione spaziale dell'ampiezza dell'area convogliata, riportata con colori che vanno dall'azzurro (corrispondente al tempo t_1) al blu (corrispondente al tempo t_4). Inoltre si riportano in verde la superficie verde, in tratteggiato grigio gli edifici e in linea rossa le direzioni lungo cui l'acqua piovana viene convogliata all'interno dell'area verde

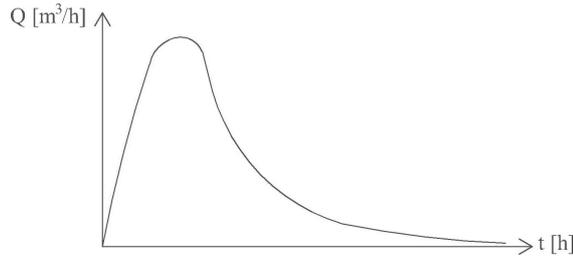


Figura 4.8: Andamento della portata in ingresso nel tempo

t_1) al blu (le aree convogliate al tempo finale, t_4 , corrispondente al tempo di corrivazione del sistema).

Ritornando quindi alle precedenti equazioni, sia Q_p che Q_{conv} sono funzione del tempo di pioggia: la stessa considerazione può essere estesa anche a Q_i .

Entrambi i contributi alla portata in ingresso presentano un andamento simile a quello schematizzato in Figura 4.8: partendo dal valore nullo, crescono fino ad un massimo e poi decrescono. Di seguito viene approfondito il comportamento delle singole variabili in esame.

La portata di pioggia, calcolata secondo l'equazione (4.7), presenta un comportamento che dipende dagli andamenti dell'intensità di pioggia e dell'area verde. Il tratto di crescita iniziale di questo parametro è pressoché assimilabile ad una linea verticale: vi è quindi un passaggio repentino dal valore nullo al picco. Infatti all'istante 0 l'area verde ancora non contribuisce alla portata di pioggia, che assume un valore inizialmente nullo, nonostante l'intensità di pioggia sia pari a infinito. Dall'istante immediatamente successivo l'area verde va a contribuire alla portata di pioggia per tutta la sua estensione, sotto l'ipotesi che l'acqua vada a distribuirsi sull'intera superficie. La portata di pioggia raggiunge quindi il picco e poi decresce, poiché l'area verde si mantiene costante e l'intensità di pioggia decresce, tendendo asintoticamente allo zero.

La portata convogliata, calcolata secondo l'equazione (4.8), presenta un comportamento che dipende dagli andamenti dell'intensità di pioggia e dall'area convogliata. L'area convogliata è inizialmente in fase di crescita ed i valori che assume sono superiori rispetto a quelli dell'intensità di pioggia, che è invece in decrescita: questo giustifica l'iniziale andamento della portata convogliata, in crescita per il prevalere dell'area convogliata. Quest'ultimo parametro cresce fino a raggiungere un valore massimo, oltre al quale si mantiene costante per il restante tempo di pioggia: il valore massimo dell'area convogliata corrisponde quindi al picco raggiunto dalla portata convogliata. Il tratto di decrescita finale di quest'ultimo parametro è giustificato dal fatto che l'area convogliata si mantiene costante mentre l'intensità di pioggia decresce.

La portata in ingresso presenta anch'essa un andamento simile a quanto schematizzato in Figura 4.8, essendo somma della portata di pioggia e di quella convogliata, i cui comportamenti sono stati descritti in precedenza.

Valutata quindi la portata in ingresso, il modello si propone di analizzare il comportamento dell'area verde nel riceverla. In questo contesto risulta fondamentale introdurre una nuova variabile, l'intensità di arrivo (i_{arr}), che può essere quantificata come:

$$i_{arr}(t) = \frac{Q_i(t)}{A_{verde}} \quad (4.9)$$

Anche i_{arr} risulta funzione del tempo di pioggia ed è espressa in m/h . Il suo andamento è simile a quello della portata in ingresso, poiché l'area verde risulta costante per tutto il tempo di pioggia (eccetto l'istante iniziale, come indicato in precedenza).

Allo scopo di esaminare il comportamento dell'area verde, deve essere introdotta una seconda variabile, la capacità d'infiltrazione del suolo, anch'essa espressa in m/h . Per valutare quest'ultimo parametro sono stati assunti diversi approcci, presentati al paragrafo 4.3.3.

Dal confronto tra l'intensità di arrivo, che rappresenta la velocità di arrivo dell'acqua, e la ca-

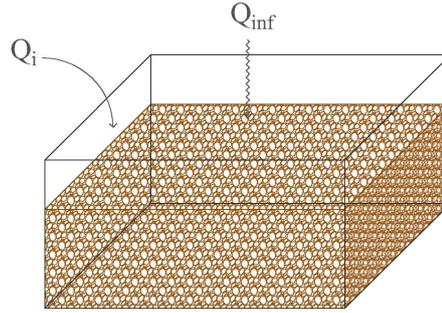


Figura 4.9: Schematizzazione del processo di infiltrazione. Si indica con Q_i la portata in ingresso e con Q_{inf} la portata infiltrata

capacità d'infiltrazione, che rappresenta la massima velocità di infiltrazione dell'acqua, è possibile analizzare il comportamento dell'area verde a seguito dell'instaurarsi di una portata in ingresso. Focalizzandosi su un determinato arco temporale, durante il quale si suppone che la precipitazione sia continua, si va ad instaurare un processo di infiltrazione dell'acqua piovana, come schematizzato in Figura 4.9, dove Q_{inf} rappresenta la portata infiltrata. In funzione del confronto tra l'intensità di arrivo (i_{arr}) e la capacità d'infiltrazione, si può verificare un accumulo di acqua piovana sulla superficie, argomento approfondito ai paragrafi 4.3.1 e 4.3.2. Lo strato d'acqua presente sulla superficie verde aumenta progressivamente nel tempo e deve essere convogliato all'esterno: per perseguire questo scopo si è scelto di inserire una serie di luci a stramazzo. Nel momento in cui la lama d'acqua supera il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) si instaura una portata in uscita (Q_u), la cui valutazione è approfondita al paragrafo 4.3.4. Quanto appena visto a livello generale evidenzia la presenza di diverse portate che interessano la zona verde: la portata in ingresso (Q_i), la portata infiltrata (Q_{inf}) e la portata in uscita (Q_u). Queste portate devono rispettare un'equazione fondamentale, ovvero la legge di conservazione della massa:

$$A_{verde} \frac{dh}{dt} = Q_i(t) - Q_{inf}(t) - Q_u(t) \quad (4.10)$$

Nell'equazione (4.10) h rappresenta l'altezza dello strato d'acqua accumulatosi sulla superficie. In Figura 4.10 viene quindi riportata una schematizzazione dell'applicazione del bilancio di massa al mezzo poroso.

Sulla base della legge di conservazione vengono quindi esaminati i due casi che emergono dal confronto tra l'intensità di arrivo e la capacità di infiltrazione dell'area verde.

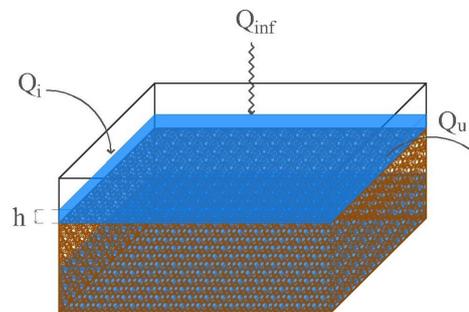


Figura 4.10: Schematizzazione della legge di conservazione della massa. Si indica con Q_i la portata in ingresso, con Q_{inf} la portata infiltrata, con Q_u la portata in uscita e con h l'altezza della lama d'acqua piovana sulla superficie verde

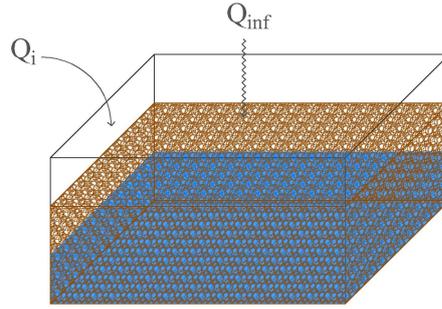


Figura 4.11: Intensità di arrivo inferiore alla capacità d'infiltrazione: schematizzazione del processo di infiltrazione. Si indica con Q_i la portata in ingresso e con Q_{inf} la portata infiltrata

4.3.1 Intensità di arrivo inferiore alla capacità d'infiltrazione

Allo scopo di analizzare l'area verde su un determinato arco temporale, è necessario effettuare ad ogni istante un confronto tra l'intensità di arrivo e la capacità di infiltrazione. Se il primo parametro è inferiore al secondo e il mezzo poroso è insaturo, allora la portata in ingresso si infiltra all'interno di esso, andando progressivamente a riempirne i pori (vedasi Figura 4.11). Il volume in ingresso si traduce totalmente in volume infiltrato, che cresce progressivamente nel tempo. Nell'istante in cui il volume infiltrato arriva ad eguagliare il massimo volume stoccabile dal mezzo, si giunge alla condizione di saturazione. Da questo momento in poi il volume in ingresso inizia ad accumularsi sulla superficie (vedasi Figura 4.12), formando uno strato di acqua piovana che aumenta progressivamente nel tempo. Nell'istante in cui il livello dello strato supera il bordo dello stramazzo, si instaura una portata in uscita.

Sono stati descritti a livello generale i fenomeni che interessano l'area verde nel caso in cui l'intensità di arrivo sia inferiore alla capacità d'infiltrazione. Risulta però necessario effettuare un passo ulteriore, traducendo quanto illustrato a livello qualitativo in equazioni.

Prendendo in considerazione la fase di saturazione del mezzo poroso, non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie, poiché l'intensità di arrivo è inferiore alla capacità d'infiltrazione. In questo frangente i termini $A_{verde}(dh/dt)$ e $Q_u(t)$ della legge di conservazione della massa (vedasi equazione 4.10) sono nulli e ne consegue che l'area verde è interessata solo dalla presenza della portata in ingresso e della portata infiltrata.

Focalizzandosi quindi su un generico istante t , è possibile calcolare il volume giunto all'interno del sistema ($V_i(t)$) dall'istante iniziale t_0 all'istante t a partire dalla portata in ingresso (Q_i).

$$V_i(t) = \int_{t_0}^t Q_i(t) dt \quad (4.11)$$

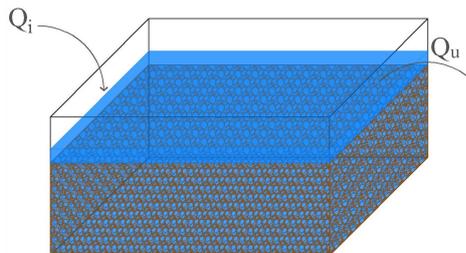


Figura 4.12: Intensità di arrivo inferiore alla capacità d'infiltrazione: schematizzazione del processo di accumulo di acqua piovana sulla superficie. Si indica con Q_i la portata in ingresso e con Q_u la portata in uscita

Il volume in ingresso viene totalmente assorbito all'interno del mezzo e, di conseguenza, il volume infiltrato ($V_{inf}(t)$) viene espresso come:

$$V_{inf}(t) = V_i(t) \quad (4.12)$$

Il processo di infiltrazione del volume in ingresso all'interno dell'area verde continua fino a quando quest'ultima raggiunge la saturazione: si indica con V_{stoc} il massimo volume stoccabile dall'area verde.

$$V_{stoc} = S \cdot A_{verde} \cdot \phi \cdot (1 - s_0) \quad (4.13)$$

Nell'equazione (4.13) S , A_{verde} , ϕ e s_0 indicano rispettivamente spessore (espresso in m), ampiezza, porosità e saturazione iniziale della zona verde.

Nel momento in cui il volume infiltrato eguaglia il massimo volume stoccabile, la portata in ingresso inizia a formare uno strato di acqua piovana che si estende su tutta la superficie verde. In questo frangente i termini $Q_{inf}(t)$ e $Q_u(t)$ della legge di conservazione della massa (vedasi equazione 4.10) sono nulli e ne consegue che la portata in ingresso va ad alimentare lo strato d'acqua piovana accumulato sulla superficie verde.

Il volume della lama d'acqua accumulata ($V_{str}(t)$) all'istante t può quindi essere calcolato come:

$$V_{str}(t) = V_i(t) - V_{stoc} \quad (4.14)$$

Il volume dello strato di acqua piovana cresce progressivamente nel tempo, fino a raggiungere il volume accumulabile (V_{acc}), corrispondente al volume compreso tra il terreno e il bordo dello stramazzo:

$$V_{acc} = p \cdot A_{verde} \quad (4.15)$$

Nell'equazione (4.15) p rappresenta il dislivello tra il terreno e il bordo dello stramazzo.

Nel momento in cui lo strato di acqua piovana supera il bordo dello stramazzo (e di conseguenza il volume dello strato eguaglia il volume accumulabile) si verifica l'instaurarsi una portata in uscita (Q_u), argomento approfondito al paragrafo 4.3.4. In questo frangente risulta nullo solo il termine $Q_{inf}(t)$ della legge di conservazione della massa (vedasi equazione 4.10).

Tutti i volumi introdotti nel presente paragrafo vengono espressi in m^3 .

4.3.2 Intensità di arrivo superiore alla capacità d'infiltrazione

Allo scopo di analizzare l'area verde su un determinato arco temporale, è necessario effettuare ad ogni istante un confronto tra l'intensità di arrivo e la capacità d'infiltrazione. Se il primo parametro è superiore al secondo e il mezzo poroso è insaturo, allora la portata in ingresso in parte si infila all'interno di esso, andando progressivamente a riempirne i pori, e in parte si accumula sulla superficie (vedasi Figura 4.13), formando uno strato d'acqua piovana che aumenta progressivamente nel tempo e che può superare il bordo dello stramazzo. Nel momento in cui il volume infiltrato arriva ad eguagliare il massimo volume stoccabile dal mezzo, si giunge alla condizione di saturazione. Da questo istante in poi il volume in ingresso va ad accumularsi sulla superficie e si ricade nella situazione già esaminata al paragrafo 4.3.1.

Sono stati quindi descritti a livello generale i fenomeni che interessano l'area verde nel caso in cui l'intensità di arrivo sia inferiore alla capacità d'infiltrazione. Risulta però necessario effettuare un passo ulteriore, traducendo quanto descritto a livello qualitativo mediante delle equazioni.

Prendendo quindi in considerazione la fase di saturazione del mezzo poroso, nel caso esaminato si verifica un accumulo di acqua piovana sulla superficie, poiché l'intensità di arrivo è superiore alla capacità d'infiltrazione. In questo frangente risulta inizialmente nullo solo il termine $Q_u(t)$ della legge di conservazione della massa (vedasi equazione 4.10).

Focalizzandosi quindi su un generico istante t , è possibile calcolare il volume giunto all'interno del sistema ($V_i(t)$) dall'istante iniziale t_0 all'istante t utilizzando l'equazione (4.11).

Rispetto al caso presentato al paragrafo 4.3.1, cambia il valore assunto dal volume infiltrato

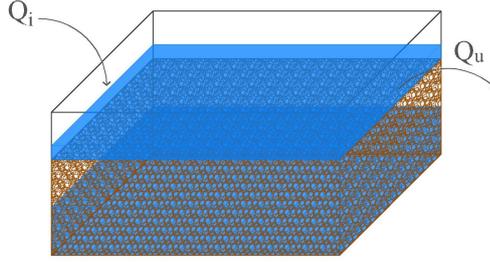


Figura 4.13: Intensità di arrivo superiore alla capacità d'infiltrazione: schematizzazione del processo di accumulo di acqua piovana sulla superficie. Si indica con Q_i la portata in ingresso e con Q_u la portata in uscita

($V_{inf}(t)$) all'istante t , calcolabile in funzione della capacità d'infiltrazione che, come indicato in precedenza, è stata valutata mediante diversi approcci. Di conseguenza si rimanda al paragrafo 4.3.3 per la quantificazione del parametro.

Indipendentemente dall'approccio assunto per valutare la capacità d'infiltrazione, il volume infiltrato risulta inferiore rispetto al volume in ingresso: a causa della differenza tra di essi, inizia a formarsi uno strato di acqua piovana che si estende su tutta la superficie verde.

$$V_{str}(t) = V_i(t) - V_{inf}(t) \quad (4.16)$$

Nell'equazione (4.16) $V_{str}(t)$ rappresenta il volume dello strato accumulato all'istante t , $V_i(t)$ il volume entrato nell'area verde all'istante t e $V_{inf}(t)$ il volume infiltrato all'istante t .

Il volume dello strato cresce progressivamente nel tempo, fino a raggiungere il volume accumulabile (V_{acc}), il cui valore è quantificabile grazie all'equazione (4.15). Nel momento in cui lo strato di acqua piovana supera il bordo dello stramazzo (e di conseguenza il volume dello strato eguaglia il volume accumulabile), si verifica l'instaurarsi di una portata in uscita (Q_u), argomento approfondito al paragrafo 4.3.4. In questo frangente la legge di conservazione della massa va a coincidere con l'equazione 4.10.

Contemporaneamente vi è un progressivo aumento del volume infiltrato, che arriva ad eguagliare il massimo volume stoccabile (V_{stoc}), calcolabile grazie all'equazione (4.13): il comportamento del sistema ricade quindi nella situazione già esaminata al paragrafo 4.3.1.

Tutti i volumi introdotti nel presente paragrafo vengono espressi in m^3 .

4.3.3 Valutazione della capacità d'infiltrazione

Riprendendo quando affermato in precedenza, uno dei parametri fondamentali nell'ambito dello studio che si sta conducendo è la capacità d'infiltrazione dell'area verde. Questo parametro è essenziale per poter esaminare il comportamento di un'area verde nel ricevere una portata in ingresso e, di conseguenza, per poter quantificare il volume infiltrato introdotto al paragrafo 4.3.2. Nell'ambito del presente elaborato di tesi, sono stati assunti diversi approcci allo scopo di quantificare la capacità d'infiltrazione. In primo luogo il parametro è stato eguagliato alla conducibilità idraulica, prendendo in considerazione i due casi opposti:

- conducibilità idraulica costante e pari al suo valore in condizione di saturazione
- conducibilità idraulica variabile nel tempo in funzione del grado di saturazione

In secondo luogo si è scelto di affinare il modello, eguagliando la capacità d'infiltrazione al tasso di infiltrazione potenziale.

Nei paragrafi successivi vengono approfonditi gli approcci scelti e vengono introdotte le equazioni adottate per quantificare il volume d'infiltrazione nel caso in cui l'intensità di arrivo sia superiore alla capacità d'infiltrazione e il mezzo sia insaturo (ricollegandosi quindi al paragrafo 4.3.2).

4.3.3.1 Conducibilità idraulica

In primo luogo si è scelto di eguagliare la capacità d'infiltrazione alla conducibilità idraulica dell'area verde (K_{unsat}), definibile come la portata volumetrica d'acqua che fluisce attraverso un mezzo poroso di sezione unitaria, sotto l'effetto di un gradiente idraulico di valore unitario, alla temperatura di $20^{\circ}C$. La conducibilità idraulica è un parametro che dipende dalla tipologia, dalla struttura e dal grado di saturazione del terreno. In questo ambito è stata espressa in m/h .

Fissata la tipologia di suolo, sono state consultate diverse fonti allo scopo di individuare la relazione tra la conducibilità idraulica e il grado di saturazione del mezzo. Si è potuto constatare che gli autori a cui si è fatto riferimento propongono un andamento della conducibilità idraulica in funzione della saturazione (s) analogo a quello rappresentato in Figura 4.14. La conducibilità idraulica parte da un valore nullo, in corrispondenza di una saturazione nulla, e cresce fino ad arrivare al valore massimo (K_{sat}), in corrispondenza di una saturazione unitaria. La curva appena descritta viene tradotta dagli autori nell'espressione:

$$K_{unsat}(t) = K_{sat} \cdot s(t)^c \quad (4.17)$$

Nell'equazione (4.17) c rappresenta un parametro empirico adimensionale e K_{sat} la conducibilità idraulica a saturazione. Entrambi i parametri dipendono dalla tipologia di suolo presa in esame e possono essere stimati in primo luogo utilizzando valori pubblicati in letteratura. In seguito possono essere quantificati accuratamente attraverso dati di campo.

Prendendo ancora in considerazione l'equazione (4.17), è possibile constatare che il grado di saturazione (e di conseguenza la conducibilità idraulica) è funzione del tempo di precipitazione (t). Sotto l'ipotesi che l'evento meteorico sia continuo durante tutto l'arco temporale analizzato, il grado di saturazione parte da un valore iniziale (s_0) e aumenta progressivamente in funzione del tempo, secondo l'andamento riportato in Figura 4.15.

In questo frangente risulta però necessario effettuare una precisazione: il grado di saturazione del mezzo poroso varia in funzione non solo del tempo di precipitazione ma anche della profondità (z) considerata, secondo l'andamento riportato in Figura 4.16. Si può notare che, all'aumentare del tempo (rappresentato con la freccia ondulata), vi è un avanzamento del fronte di acqua piovana che man mano si infila agli strati più profondi, facendone aumentare progressivamente il grado di saturazione. In questo frangente si è però scelto di effettuare un'approssimazione, considerando il grado di saturazione costante con la profondità e variabile solo nel tempo.

Nell'ambito del presente elaborato di tesi, si è ipotizzato in primo momento che la conducibilità idraulica sia costante e pari al suo valore in condizioni di saturazione, il massimo a cui essa possa arrivare (vedasi Figura 4.14). Imponendo questa condizione si trascura il fatto che l'area verde sia in realtà un mezzo insaturo.

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 4.3.2, è quindi possibile esprimere il volume infiltrato

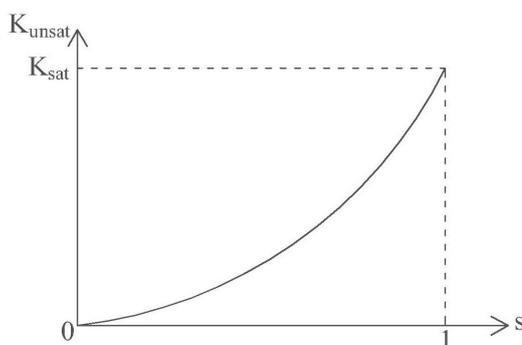


Figura 4.14: Andamento della conducibilità idraulica in funzione del grado di saturazione. Si indica con K_{sat} la conducibilità idraulica a saturazione

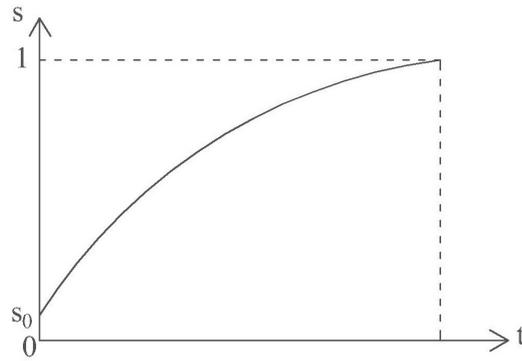


Figura 4.15: *Andamento del grado di saturazione in funzione del tempo. Si indica con s_0 il grado di saturazione iniziale*

($V_{inf}(t)$) dall'istante iniziale t_0 all'istante t come:

$$V_{inf}(t) = (K_{sat} \cdot A_{verde})(t - t_0) \quad (4.18)$$

Nell'equazione (4.18) A_{verde} indica l'ampiezza dell'area verde.

In un secondo momento la capacità d'infiltrazione è stata eguagliata alla conducibilità idraulica, tenendone in considerazione la dipendenza dal grado di saturazione.

Allo scopo di valutare il volume infiltrato all'istante t , è stato necessario effettuare un ragionamento più complesso rispetto al caso precedentemente analizzato.

Considerando un generico istante t , è possibile esprimere il grado di saturazione ($s(t)$) come:

$$s(t) = \frac{s_0 \cdot V_{pori} + V_{inf}(t)}{V_{pori}} \quad (4.19)$$

Nell'equazione (4.19) s_0 rappresenta il grado di saturazione iniziale, V_{pori} il volume dei pori e $V_{inf}(t)$ il volume infiltrato all'istante t .

Il volume dei pori può a sua volta essere calcolato grazie all'espressione:

$$V_{pori} = \phi \cdot A_{verde} \cdot S \quad (4.20)$$

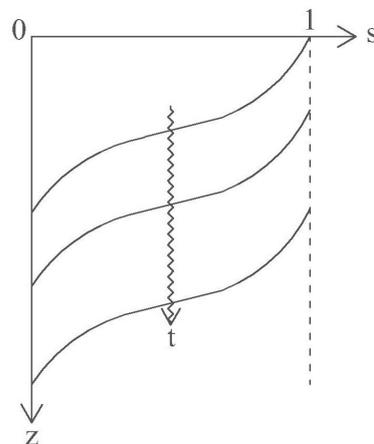


Figura 4.16: *Andamento del grado di saturazione in funzione della profondità, al variare del tempo t . La freccia ondulata indica che, all'aumentare del tempo, vi è un avanzamento del fronte d'acqua piovana e quindi un aumento del grado di saturazione*

Nell'equazione (4.20) ϕ e S indicano rispettivamente porosità e spessore dell'area verde. Il volume infiltrato dall'istante iniziale t^0 all'istante t può essere espresso come:

$$V_{inf}(t) = \int_{t_0}^t A_{verde} \cdot K_{unsat}(t) dt \quad (4.21)$$

Come si può notare dall'equazione (4.21), il volume infiltrato dipende dalla conducibilità idraulica. Questo parametro a sua volta dipende dal grado di saturazione (vedasi equazione (4.17)), che a sua volta dipende dal volume infiltrato (vedasi equazione (4.19)), che è però il parametro che si intende calcolare. Per poter risolvere il problema appena esposto, è necessario passare dal campo del continuo a quello del discreto, applicando un processo iterativo: si rimanda quindi al paragrafo 4.5.

In entrambi i casi analizzati (conducibilità idraulica costante e pari al suo valore in condizione di saturazione e conducibilità idraulica variabile nel tempo in funzione del grado di saturazione) sono state effettuate delle approssimazioni: nel primo caso si è trascurato il fatto che l'area verde sia in realtà un mezzo insaturo mentre nel secondo si è trascurato il fatto che il grado di saturazione sia variabile con la profondità, oltre che con il tempo. È stato quindi necessario effettuare un ulteriore approfondimento, individuando un modello matematico più preciso nel descrivere il processo d'infiltrazione all'interno dell'area verde.

4.3.3.2 Tasso di infiltrazione potenziale

In secondo luogo si è scelto di eguagliare la capacità d'infiltrazione al tasso di infiltrazione potenziale (f_p), effettuando quindi un affinamento del modello del processo d'infiltrazione. Per poter definire questo parametro è necessario in primo luogo introdurre il concetto di tasso di infiltrazione reale (f), che rappresenta l'altezza della lama d'acqua che penetra attraverso la superficie del suolo nell'unità di tempo. Ne consegue che il tasso di infiltrazione potenziale rappresenta il tasso di infiltrazione che si verificherebbe nell'ipotesi che la disponibilità d'acqua sia sufficiente ad alimentare la massima infiltrazione possibile.

Allo scopo di quantificare il tasso di infiltrazione potenziale, sono stati elaborati numerosi modelli matematici, che esprimono il parametro in funzione del tempo o di ulteriori variabili. Tra di essi si è scelto di far riferimento al modello di Horton, che rappresenta una delle leggi maggiormente utilizzate nell'ambito della progettazione fognaria. Il modello quindi permette di valutare l'andamento del tasso di infiltrazione potenziale di un mezzo poroso nel tempo come:

$$f_p(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4.22)$$

Nell'equazione (4.22) f_0 è il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale, espresso in m/h , f_c è il valore costante a cui il tasso di infiltrazione potenziale tende asintoticamente, espresso in m/h , e k è una costante di tempo, espresso in h^{-1} . Il tasso di infiltrazione potenziale viene quindi espresso in m/h .

I parametri f_0 , f_c e k dipendono dalla tipologia di suolo presa in esame: essi possono essere in primo luogo stimati utilizzando valori pubblicati in letteratura o attraverso la calibrazione di modelli complessi di drenaggio delle acque meteoriche. In seguito possono essere quantificati accuratamente attraverso dati di campo.

Fissati i valori dei parametri per un determinato tipo di suolo, l'equazione di Horton può essere rappresentata secondo la curva riportata in Figura 4.17. Partendo dal valore massimo f_0 , il tasso di infiltrazione potenziale decresce esponenzialmente all'aumentare del tempo di precipitazione, raggiungendo il valore minimo f_c e mantenendosi quindi costante.

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 4.3.2, è quindi possibile esprimere il volume infiltrato ($V_{inf}(t)$) dall'istante iniziale t_0 all'istante t come:

$$V_{inf}(t) = \int_{t_0}^t f_p(t) \cdot A_{verde} dt \quad (4.23)$$

Nell'equazione 4.23 A_{verde} rappresenta l'ampiezza dell'area verde.

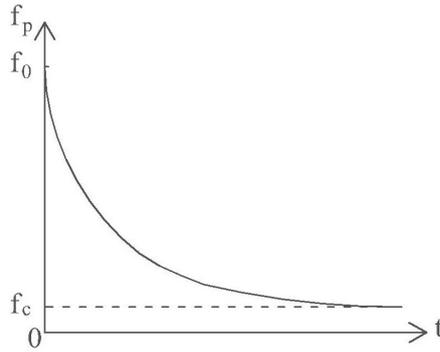


Figura 4.17: Andamento del tasso di infiltrazione potenziale di Horton in funzione del tempo per un determinato tipo di suolo

4.3.4 Valutazione della portata in uscita

In seguito ai meccanismi illustrati ai paragrafi 4.3.1 e 4.3.2, va ad instaurarsi una portata in uscita legata al volume accumulato sulla superficie verde oltre il bordo dello stramazzo. Allo scopo di convogliare questo volume verso l'esterno, si è scelto di inserire una serie di luci a stramazzo, dopo averne confrontato le caratteristiche con la tipologia a battente. Questa seconda opzione è stata scartata poiché, rispetto alla prima, è più difficile da costruire, da gestire (presenta un rischio di intasamento maggiore) e per funzionare necessita della presenza di un carico d'acqua maggiore.

In prima approssimazione si è ipotizzato che le luci a stramazzo inserite non oppongano resistenza all'uscita del flusso di acqua piovana: tutto il volume accumulato sulla superficie verde oltre il bordo dello stramazzo viene convogliato verso l'esterno. In questo frangente si è considerato nullo il termine $A_{verde}(dh/dt)$ della legge di conservazione della massa (vedasi equazione 4.10). Per quanto concerne invece il termine $Q_{inf}(t)$, esso risulta nullo solo nel caso in cui l'area verde abbia raggiunto la condizione di saturazione.

L'intera quota del volume dello strato che supera il bordo dello stramazzo viene convogliata verso l'esterno e si traduce quindi in volume in uscita (V_u). All'istante t il volume in uscita ($V_u(t)$) può quindi essere calcolato mediante l'espressione:

$$V_u(t) = V_i(t) - V_{inf}(t) - V_{acc} - \int_{t_0}^t Q_u(t)dt \quad (4.24)$$

Nell'equazione (4.24) $V_i(t)$ rappresenta il volume entrato nell'area verde all'istante t , $V_{inf}(t)$ il volume infiltrato all'istante t e V_{acc} il volume accumulabile. L'ultimo addendo rappresenta il volume totale uscito dall'area verde dall'istante iniziale t_0 all'istante considerato (t), calcolato come integrale della portata in uscita. Se l'area verde è giunta alla condizione di saturazione, il volume infiltrato all'istante t va ad eguagliare il massimo volume stoccabile dall'area verde (V_{stoc}).

Conoscendo il valore del volume in uscita all'istante t , è possibile calcolare la portata in uscita grazie all'espressione:

$$Q_u(t) = \frac{dV_u}{dt} \quad (4.25)$$

La portata in uscita presenta un andamento che dipende sia dall'evoluzione della portata in ingresso che dall'assorbimento di acqua piovana effettuato dall'area verde. In Figura 4.18 viene riportata la curva relativa alla portata in uscita, insieme a quella relativa alla portata in ingresso. Per poter valutare il ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata che, in sua assenza, enterebbe all'interno del sistema fognario, risulta necessario confrontare le due curve. A questo

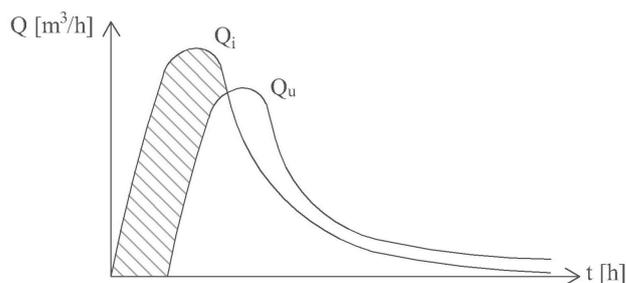


Figura 4.18: Andamento della portata in uscita Q_u nel tempo, confrontata con la portata in ingresso Q_i

scopo sono stati introdotti i seguenti parametri, che permettono di giudicare la prestazione offerta dall'area verde: tempo di instaurazione della portata in uscita (t_u), tasso di abbattimento (η), volume trattenuto dall'area verde (V_t) e tempo di raggiungimento della saturazione dell'area verde (t_{sat}).

In primo luogo risulta necessario identificare il momento in cui si instaura la portata in uscita (espresso in h), che viene convogliata verso il sistema fognario. Si tratta di un istante fondamentale, poiché il flusso di acqua piovana torna ad essere immesso all'interno della rete fognaria, da cui era stato temporaneamente allontanato. Maggiore è il tempo di instaurazione della portata in uscita, migliore è la prestazione dell'area verde.

È inoltre indispensabile valutare la riduzione del picco della portata in ingresso effettuata dall'area verde, calcolando il tasso di abbattimento:

$$\eta = \frac{\max(Q_u)}{\max(Q_i)} \quad (4.26)$$

Nell'equazione (4.26) $\max(Q_u)$ rappresenta il picco della portata in uscita mentre $\max(Q_i)$ rappresenta il picco della portata in ingresso. Minore è il tasso di abbattimento, migliore è la prestazione dell'area verde.

Un ulteriore parametro da valutare è il volume trattenuto dall'area verde (rappresentato dall'area tratteggiata presente in Figura 4.18), corrispondente alla somma del volume infiltrato all'interno del mezzo e di quello accumulato su di esso ed espresso in m^3 . Si tratta di un parametro importante nell'ottica di determinare l'entità della quota del flusso in ingresso che viene trattenuta dall'area verde: maggiore è il volume trattenuto, migliore è la prestazione dell'area verde.

L'ultimo parametro necessario è il tempo di raggiungimento della saturazione (espresso in h), che corrisponde all'istante in cui si interrompe il ruolo dell'area verde nell'assorbire e abbattere la portata in ingresso. Maggiore è il tempo di raggiungimento della saturazione, migliore è la prestazione dell'area verde.

4.4 Modellazione del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 4.3.4, si è scelto di inserire una serie di luci a stramazzo allo scopo di convogliare all'esterno lo strato d'acqua piovana che va ad accumularsi sull'area verde. Nel momento in cui termina l'evento di precipitazione, si può però riscontrare una situazione in cui l'area verde è satura e su di essa è presente una lama d'acqua piovana accumulata. Quest'ultima può presentare un'altezza tale per cui va a permanere per lungo tempo sulla superficie verde, nonostante si verifichi un processo di evapotraspirazione che agisce su di essa: si possono, di conseguenza, verificare danni alla vegetazione presente.

Risulta quindi necessario valutare in primo luogo il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p), che rappresenta la massima altezza a cui la lama d'acqua piovana può arrivare. Nel caso in

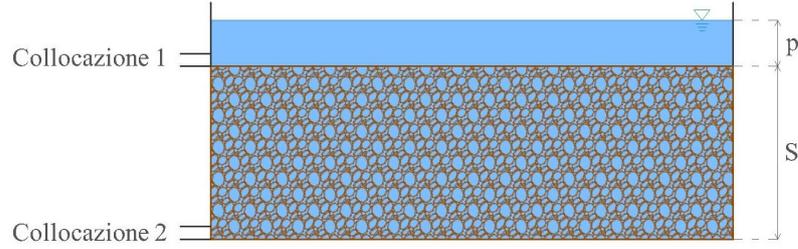


Figura 4.19: Possibili collocazioni della bocca di scarico tarata. Si indica con S lo spessore dell'area verde e con p il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo

cui il parametro assuma un valore eccessivamente alto, si presenta il rischio di danneggiamento dalla vegetazione precedentemente indicato. Allo scopo di risolvere il problema, si è deciso di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato d'acqua piovana accumulato. In questo frangente, sono state ipotizzate due collocazioni dello scarico: all'estremità superiore (vedasi "Collocazione 1" in Figura 4.19) e all'estremità inferiore (vedasi "Collocazione 2" in Figura 4.19) dell'area verde. Nei paragrafi 4.4.1 e 4.4.2 vengono approfonditi i due casi scelti, individuando per ciascuno di essi il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) e la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}). Il primo parametro viene espresso in h mentre il secondo in m^2 . Conoscendo il valore della sezione, è possibile valutare il diametro della bocca di scarico (ϕ_{luce}), che viene espresso in cm :

$$\phi_{luce} = \sqrt{\frac{4\Omega_{luce}}{\pi}} \quad (4.27)$$

4.4.1 Bocca di scarico collocata all'estremità superiore dell'area verde

Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità superiore dell'area verde (vedasi "Collocazione 1" in Figura 4.19), è necessario far riferimento alla legge di efflusso da una luce a battente per poter quantificare il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) e l'area della bocca di scarico (Ω_{luce}). La legge di efflusso viene espressa come:

$$A_{verde} \frac{dh}{dt} = m \cdot \Omega_{luce} \sqrt{2gh(t)} \quad (4.28)$$

Nell'equazione (4.28) A_{verde} rappresenta l'ampiezza dell'area verde, h l'altezza della colonna d'acqua sulla luce (espressa in m), t il tempo, m il coefficiente di contrazione (pari a 0.61), Ω_{luce} l'area della luce e g l'accelerazione di gravità (pari a $9.81 m/s^2$).

Dal momento che si ha a disposizione una sola equazione per quantificare due incognite, si è scelto di assegnare un valore al tempo di smaltimento della lama d'acqua piovana, calcolando di conseguenza l'area della bocca di scarico.

Si può notare che la (4.28) è un'equazione differenziale del primo ordine a variabili separabili. È stato quindi possibile risolverla e quantificare l'area della bocca di scarico, stabilendo due condizioni al contorno.

Si è scelto di porre come condizione iniziale che, all'istante t_0 , l'altezza della colonna d'acqua sulla luce sia pari al dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p), che rappresenta il massimo valore che essa può assumere:

$$h(t_0) = p \quad (4.29)$$

Inoltre si è scelto di porre come condizione finale che, all'istante t_{svuot} , l'altezza della colonna d'acqua sulla luce sia pari a 0:

$$h(t_{svuot}) = 0 \quad (4.30)$$

Stabilendo quindi le condizioni (4.29) e (4.30), è stato possibile calcolare il valore dell'area della bocca di scarico:

$$\Omega_{luce} = \frac{2A_{verde}\sqrt{p}}{m \cdot t_{svuot}\sqrt{2g}} \quad (4.31)$$

4.4.2 Bocca di scarico collocata all'estremità inferiore dell'area verde

Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità inferiore dell'area verde (vedasi "Collocazione 2" in Figura 4.19), è necessario tenere in considerazione non soltanto il processo di efflusso attraverso di essa ma anche il processo di infiltrazione all'interno del terreno, allo scopo di quantificare il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) e l'area della bocca di scarico (Ω_{luce}). Risulta quindi indispensabile far riferimento sia alla legge di efflusso da una luce a battente, descritta al paragrafo 4.4.1, sia alla legge di Darcy, espressa come:

$$\frac{dh}{dt} = K_{sat} \frac{h(t)}{S} \quad (4.32)$$

Nell'equazione (4.32) h rappresenta l'altezza della colonna d'acqua sulla luce, t il tempo, K_{sat} la conducibilità idraulica a saturazione e S lo spessore dell'area verde.

In funzione dell'area della bocca di scarico, vi è la prevalenza di uno dei due processi precedentemente citati sul valore del tempo di smaltimento della lama d'acqua piovana. Infatti nel caso in cui l'area della bocca di scarico presenti un valore basso, il tempo necessario allo smaltimento dello strato d'acqua accumulato è elevato e prevale l'effetto dell'efflusso attraverso la luce. Invece nel caso in cui l'area della bocca di scarico presenti un valore elevato, il tempo necessario allo smaltimento dello strato d'acqua accumulato è basso e prevale l'effetto dell'infiltrazione all'interno del terreno. Nell'ambito del presente elaborato di tesi, si è scelto di considerare i due effetti ugualmente influenti, andando prima a calcolare il tempo di smaltimento della lama d'acqua piovana grazie alla legge di Darcy e poi ad utilizzare questo valore per quantificare l'area della bocca di scarico grazie alla legge di efflusso da una luce a battente.

Si può notare che la (4.32) è un'equazione differenziale del primo ordine a variabili separabili. È stato quindi possibile risolverla e quantificare il tempo di smaltimento della lama d'acqua piovana stabilendo due condizioni al contorno.

Si è scelto di porre come condizione iniziale che, all'istante t_0 , l'altezza della colonna d'acqua sulla luce sia pari al massimo valore che essa può assumere, corrispondente alla somma fra il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) e lo spessore dell'area verde:

$$h(t_0) = S + p \quad (4.33)$$

Si è scelto di porre come condizione finale che, all'istante t_{svuot} , l'altezza della colonna d'acqua sulla luce sia pari a allo spessore dell'area verde:

$$h(t_{svuot}) = S \quad (4.34)$$

Stabilendo quindi le condizioni (4.33) e (4.34), è stato possibile calcolare il valore del tempo di smaltimento della lama d'acqua piovana:

$$t_{svuot} = \frac{S}{K_{sat}} [\ln(S + p) - \ln(S)] \quad (4.35)$$

Sostituendo il valore calcolato grazie all'equazione (4.35) all'interno dell'equazione (4.31), è possibile quantificare l'area della bocca di scarico tenendo in considerazione sia il processo di efflusso attraverso la luce sia il processo di infiltrazione attraverso il terreno.

4.5 Elaborazione del programma

Dopo aver sviluppato il modello matematico relativo al problema in esame, è stato necessario tradurlo in un programma mediante il software *MATLAB*, applicabile all'area verde. A questo scopo è stata effettuata una discretizzazione del modello, elaborato nel campo del continuo: si è scelto di dividere l'arco temporale considerato in passi di ampiezza costante (Δt). Il passaggio dal campo del continuo a quello del discreto determina un cambiamento in alcune delle equazioni descritte ai paragrafi 4.3 e 4.4, di seguito analizzate.

Focalizzandosi su un generico istante i -esimo (t_i), l'equazione (4.11) viene trasformata nell'espressione:

$$V_i(t_i) = \sum_{k=1}^i \frac{[Q_i(t_k) + Q_i(t_{k-1})](t_k - t_{k-1})}{2} \quad (4.36)$$

dove $V_i(t_i)$ rappresenta il volume in ingresso all'istante t_i , mentre $Q_i(t_{k-1})$ e $Q_i(t_k)$ rappresentano i valori di portata in ingresso rispettivamente agli istanti t_{k-1} e t_k , estremi del passo temporale scelto.

L'equazione (4.21) viene trasformata nell'espressione:

$$V_{inf}(t_i) = \sum_{k=1}^i \frac{[K_{unsat}(t_k) + K_{unsat}(t_{k-1})]A_{verde}(t_k - t_{k-1})}{2} \quad (4.37)$$

dove $V_{inf}(t_i)$ rappresenta il volume infiltrato all'istante t_i , mentre $K_{unsat}(t_{k-1})$ e $K_{unsat}(t_k)$ rappresentano i valori di conducibilità idraulica rispettivamente agli istanti t_{k-1} e t_k , estremi del passo temporale scelto.

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 4.3.3.1, si può notare dall'equazione (4.37) che il volume infiltrato dipende dalla conducibilità idraulica. Questo parametro a sua volta dipende dal grado di saturazione (vedasi equazione (4.17)), che a sua volta dipende dal volume infiltrato (vedasi equazione (4.19)), che è però il parametro che si intende calcolare. Per poter risolvere il problema appena esposto, è necessario passare dal campo del continuo a quello del discreto, applicando un processo iterativo.

Considerando una generica iterazione k -esima, ad un generico istante t_i , viene scelto un valore iniziale di conducibilità idraulica ($K_{unsat_iter}^k(t_i)$). Sulla base di questo parametro è possibile calcolare il volume infiltrato ($V_{inf}^k(t_i)$) e, di conseguenza, il grado di saturazione ($s^k(t_i)$): a partire da quest'ultimo, è possibile calcolare un nuovo valore di conducibilità idraulica ($K_{unsat}^k(t_i)$), che viene confrontato con il valore scelto all'inizio dell'iterazione. Se la differenza tra i due valori è minore di una tolleranza predefinita ($toll$), allora si giunge alla convergenza del problema e il processo iterativo si arresta.

$$|K_{unsat}^k(t_i) - K_{unsat_iter}^k(t_i)| < toll \quad (4.38)$$

Nell'espressione (4.38) viene riportata la condizione di convergenza del problema.

Nel caso in cui la condizione di convergenza non venga rispettata, si avvia una nuova iterazione, scegliendo come valore iniziale di conducibilità idraulica quello calcolato alla precedente iterazione:

$$K_{unsat_iter}^{k+1}(t_i) = K_{unsat}^k(t_i)$$

Alla prima iterazione effettuata all'istante i -esimo, viene posto un valore di conducibilità idraulica pari al valore che il parametro stesso assume all'istante precedente ($K_{unsat}(t_{i-1})$).

$$K_{unsat_iter}^I(t_i) = K_{unsat}(t_{i-1})$$

Focalizzandosi su un generico istante i -esimo (t_i), l'equazione (4.23), essa viene trasformata nell'espressione:

$$V_{inf}(t_i) = \sum_{k=1}^i \frac{[f_p(t_k) + f_p(t_{k-1})]A_{verde}(t_k - t_{k-1})}{2} \quad (4.39)$$

dove $V_{inf}(t_i)$ rappresenta il volume infiltrato all'istante t_i , mentre $f_p(t_{k-1})$ e $f_p(t_k)$ rappresentano i valori del tasso di infiltrazione potenziale di Horton rispettivamente agli istanti t_{k-1} e t_k , estremi del passo temporale scelto.

L'equazione (4.24) viene trasformata nell'espressione:

$$V_u(t_i) = V_i(t_i) - V_{inf}(t_i) - V_{acc} - \sum_{k=1}^{i-1} [Q_u(t_{k-\frac{k}{2}})(t_k - t_{k-1})] \quad (4.40)$$

dove $V_u(t_i)$ rappresenta il volume in uscita all'istante t_i , $V_i(t_i)$ il volume in ingresso all'istante t_i , $V_{inf}(t_i)$ il volume infiltrato all'istante t_i , V_{acc} il volume accumulabile, $Q_u(t_{k-\frac{k}{2}})$ la portata in uscita all'istante $t_{k-\frac{k}{2}}$, a metà del passo temporale scelto (di estremi t_{k-1} e t_k).

Infine l'equazione (4.25) viene trasformata nell'espressione:

$$Q_u(t_{i-\frac{i}{2}}) = \frac{V_u(t_i)}{t_i - t_{i-1}} \quad (4.41)$$

dove $Q_u(t_{i-\frac{i}{2}})$ rappresenta il valore della portata in uscita all'istante $t_{i-\frac{i}{2}}$, $V_u(t_i)$ il volume in uscita all'istante t_i , mentre gli istanti t_{i-1} e t_i sono gli estremi del passo temporale scelto

Capitolo 5

Area verde A

Dopo aver elaborato il programma mediante il software *MATLAB*, è stato possibile esaminare un primo caso studio, corrispondente all'area verde A indicata al paragrafo 3.3 e situata all'interno della Cittadella del Politecnico di Torino, fra la Mensa Universitaria Castelfidardo e Corso Castelfidardo. In Figura 5.1(a) ne viene riportata una foto aerea (in cui l'area verde è delimitata da una linea rossa), mentre in Figura 5.1(b) una foto ripresa sul luogo.

La zona è stata scelta in base all'ampiezza propria e della potenziale superficie convogliata, oltre che per la disponibilità di informazioni precise sulla rete fognaria bianca.

5.1 Analisi delle caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche

In primo luogo sono state valutate le caratteristiche principali dell'area verde esaminata: in questo frangente è stata indispensabile la planimetria fornita dall'Edilog. Grazie al software *AutoCAD*, è stata misurata l'ampiezza dell'area verde (A_{verde}), pari a $746.74 m^2$. Per quanto riguarda le altre caratteristiche, non erano disponibili dati rilevati in sito. Si è quindi ipotizzato un terreno da giardino di tipo sabbioso, individuando i valori dei relativi parametri da ricerche in letteratura:

- porosità (ϕ) = 0.4 (valore tipico per un terreno da giardino sabbioso [3])
- conducibilità idraulica in condizioni sature (K_{sat}) = 10^{-5} - $10^{-2} m/s$ (range di valori tipici per un terreno da giardino sabbioso [2])



(a) Foto aerea: zona verde delimitata da una linea rossa (fonte: Google Earth)



(b) Foto ripresa sul luogo

Figura 5.1: Foto dell'area verde A

- saturazione iniziale (s_0) = 0.2 - 0.4 (range di valori tipici per un terreno da giardino sabbioso)
- spessore (S) a partire da 0.2 m (valore minimo per un terreno da giardino)

Per quanto concerne il valore da assegnare al parametro empirico c , necessario per valutare il rapporto tra la conducibilità idraulica e il grado di saturazione (vedasi equazione (4.17)), si è scelto di far riferimento al lavoro di Clapp e Hornberger [3]. I due autori hanno espresso c in funzione di un altro parametro empirico, b , secondo l'espressione:

$$c \approx 2b + 3 \quad (5.1)$$

La scelta è stata effettuata analizzando i valori che Clapp e Hornberger hanno assegnato ad altri parametri relativi ad un terreno di tipo sabbioso, quale quello oggetto di studio. In particolare, la porosità individuata dai due autori nel corso delle analisi statistiche assume un valore simile a quello scelto nell'ambito del presente elaborato di tesi.

Il valore del parametro b individuato è risultato quindi pari a 4.05, con una deviazione standard di 1.78.

Per quanto riguarda i parametri necessari alla valutazione del tasso di infiltrazione potenziale (vedasi equazione (4.22)), sono state consultate diverse fonti, allo scopo di individuare i valori tipici per un terreno sabbioso. Sono stati quindi scelti i seguenti valori, relativi ad un suolo sabbioso della pianura costiera della Georgia, negli Stati Uniti [6]:

- $f_0 = 584.5 \text{ mm/h}$
- $f_c = 45.7 \text{ mm/h}$
- $k = 32.71 \text{ h}^{-1}$

In secondo luogo sono stati determinati l'ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) e il tempo di corrivazione (t_c) relativi all'area verde, facendo riferimento alla planimetria a disposizione. Innanzitutto è stata valutata l'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la zona verde, analizzando la pendenza del terreno e la posizione dei pluviali degli edifici vicini: è stato necessario effettuare dei sopralluoghi per compensare l'eventuale mancanza di dati. Sulla base delle informazioni acquisite, si è ipotizzato in primo luogo di dirigere i pluviali della Mensa Universitaria Castelfidardo verso la zona verde. Per quanto riguarda invece i cordoli, si è potuto constatare che il loro livello ricade a filo della superficie verde. Si è quindi ipotizzato di alzarli rispetto al loro attuale livello, andando ad effettuarvi dei tagli per permettere all'acqua di pioggia che cade sul tratto asfaltato tra l'edificio e l'area verde di giungere all'interno di quest'ultima. In Figura 5.2(a) vengono riportati l'area convogliata e il percorso più lungo con cui l'acqua di pioggia arriva all'area verde, corrispondente al tratto che unisce il tetto della Mensa Universitaria Castelfidardo e la zona verde. La posizione del pluviale facente parte del percorso di corrivazione (vedasi Figura 5.2(b)) non corrisponde a quanto indicato sulla planimetria ma è stata accertata tramite sopralluogo.

Grazie al software *AutoCAD* è stato possibile misurare sulla planimetria i seguenti dati:

- ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) = 1551.83 m²
- lunghezza del percorso di corrivazione (L_{pr}) = 44.02 m (corrispondente al tratto di collegamento tra il tetto della Mensa Universitaria Castelfidardo e l'area verde, indicato in Figura 5.2(b))

Dopo aver determinato la lunghezza del percorso di corrivazione, ci si è focalizzati sulla valutazione del tempo di corrivazione (vedasi equazione (4.3)). Per quanto riguarda gli altri parametri necessari al calcolo, sono state avanzate le seguenti ipotesi, sulla base dei valori maggiormente utilizzati nella progettazione delle reti fognarie:

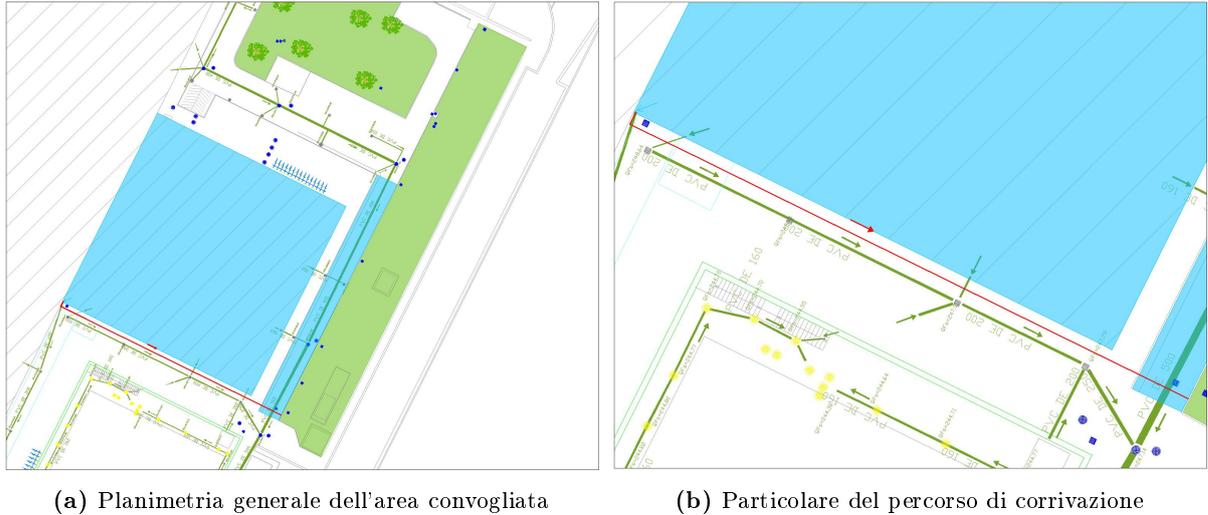


Figura 5.2: *Planimetria dell'area analizzata. Si riportano in azzurro l'area convogliata, in verde la superficie verde, in tratteggiato grigio gli edifici, con cerchi o quadrati grigi le caditoie, con cerchi o quadrati blu i tombini, in linea verde la rete fognaria bianca e in linea rossa il percorso di corrivazione*

- tempo di ingresso in rete (t_{ir}) = 1.5 min
- velocità di percorso della rete (v_{pr}) = 0.75 m/s

Basandosi sui dati forniti, è stato ottenuto un tempo di corrivazione (t_c) pari a $4.13 \cdot 10^{-2} h$ (circa 2 min).

5.2 Analisi dell'andamento delle precipitazioni

Per quanto riguarda l'andamento delle precipitazioni sull'area considerata, si è fatto riferimento al servizio "Atlante delle piogge intense" elaborato da Arpa Piemonte [11], che consente di ricavare in qualsiasi punto del territorio piemontese le curve di probabilità pluviometrica, per un assegnato periodo di ritorno e per durate da 10 min a 24 h.

Focalizzandosi sul comune di Torino, sono stati individuati tramite questo strumento i dati di altezza di pioggia (h_p) per durate (t) di 10 min, 20 min, 30 min, 1 h, 3 h, 6 h, 12 h e 24 h e per tempi di ritorno di 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 anni. Interpolando i dati forniti con una linea polinomiale di primo grado, è stato possibile ricavare i parametri a e n delle curve, scegliendo tempi di ritorno di 2, 5 e 10 anni: i risultati conseguiti sono riportati in Tabella 5.1.

Sulla base dei parametri ottenuti, sono state ricostruite le curve di probabilità pluviometrica su un arco temporale da 10 min a 24 h, corrispondenti rispettivamente al limite inferiore e superiore dell'intervallo in cui ricadono i dati disponibili (vedasi Figura 5.3).

Tabella 5.1: *Parametri delle curve di probabilità pluviometrica, al variare del periodo di ritorno T*

T [anni]	a	n
2	33.19	0.2598
5	45.95	0.2595
10	54.35	0.2597

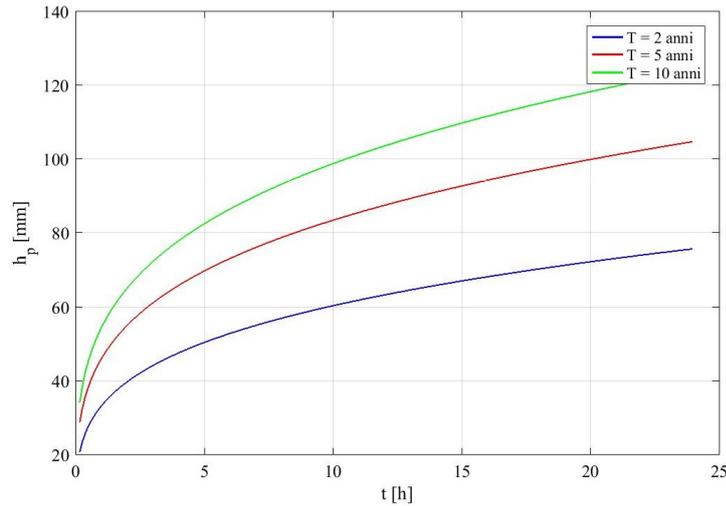


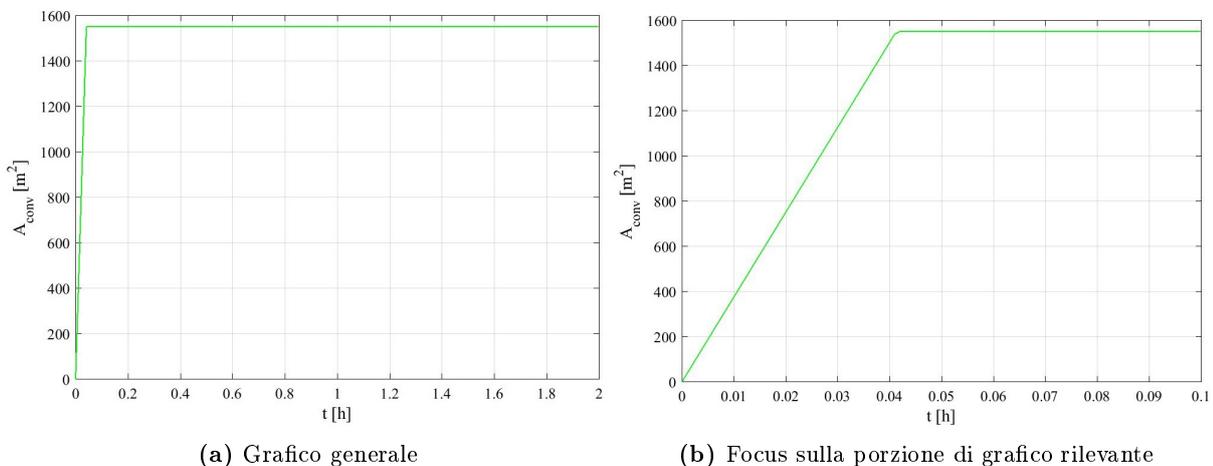
Figura 5.3: Curve di probabilità pluviometrica relative al comune di Torino, per diversi periodi di ritorno T

5.3 Analisi del processo di infiltrazione

Partendo dai dati presentati ai paragrafi precedenti, è stato implementato sulla zona verde il programma elaborato mediante il software *MATLAB*. Si è scelto di analizzare l'area verde su un arco temporale da 0 a 2 h, discretizzato in passi di ampiezza 0.001 h, fissando il tempo di ritorno (T) a 2 anni.

In primo luogo è stato esaminato l'andamento dell'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la superficie verde (vedasi Figura 5.4(a)): partendo dal valore nullo, essa aumenta seguendo un percorso rettilineo fino ad arrivare ad un massimo di 1551.83 m^2 , in corrispondenza del tempo di corrivazione. Da questo istante in poi si mantiene costante all'aumentare del tempo di precipitazione. In Figura 5.4(b) viene riportato un focus sulla porzione di grafico più rilevante, relativa al tratto di crescita del parametro.

Si è poi passati a valutare l'intensità di pioggia sulla base dell'andamento delle precipitazioni caratteristico dell'area considerata (vedasi equazione (4.6)). In questo frangente è però emerso un problema legato al fatto che le curve di probabilità pluviometrica coprono un arco temporale da 10 min a 24 h mentre l'area verde viene studiata a partire dall'istante 0. A causa della man-



(a) Grafico generale

(b) Focus sulla porzione di grafico rilevante

Figura 5.4: Andamento dell'ampiezza dell'area convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

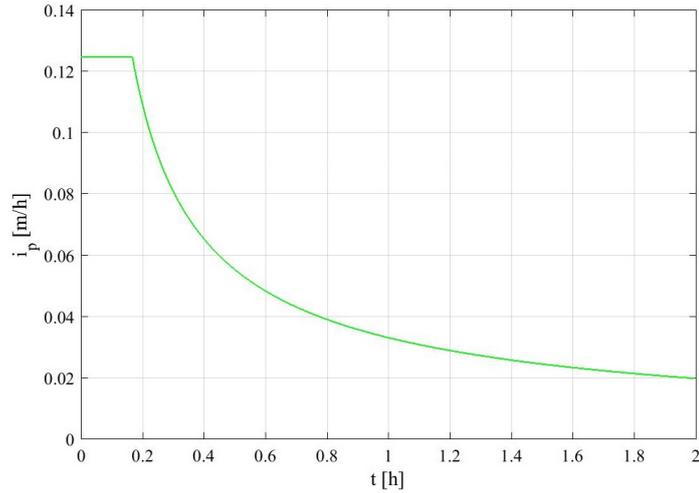


Figura 5.5: Andamento dell'intensità di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

canza di dati relativi alle altezze di pioggia da 0 a 10 *min*, si è ipotizzato di mantenere l'intensità di pioggia costante su questo arco temporale, eguagliandola al valore che essa stessa assume in corrispondenza di un tempo pari a 10 *min*. In Figura 5.5 viene riportato il risultato ottenuto: il parametro parte da un valore pari a $1.25 \cdot 10^{-1} \text{ m/h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Sulla base dei risultati ottenuti e dei dati a disposizione è stato quindi possibile analizzare la portata in ingresso, pari alla somma tra la portata di pioggia e la portata convogliata (vedasi equazione (4.5)).

Il primo dei due contributi, calcolato mediante l'equazione (4.7), presenta l'andamento riportato in Figura 5.6: partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino ad un massimo di $93.18 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Per quanto riguarda il secondo contributo alla portata in ingresso, calcolato mediante l'equazione (4.8), si rimanda al grafico riportato in Figura 5.7: partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $193.73 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Si è quindi potuto analizzare l'andamento della portata in ingresso (vedasi Figura 5.8): partendo

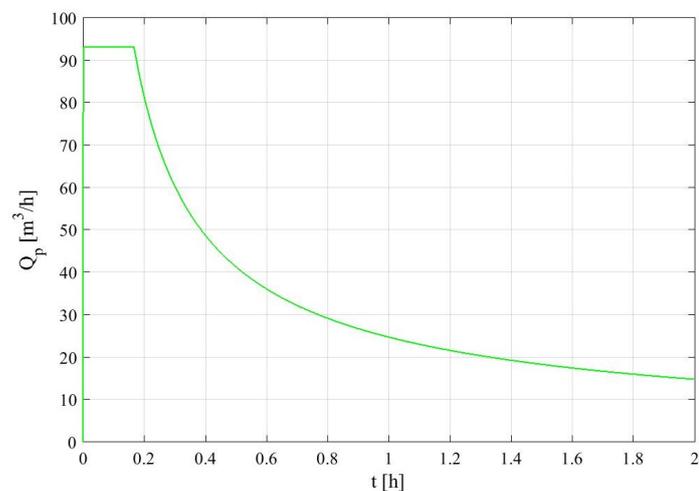


Figura 5.6: Andamento della portata di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

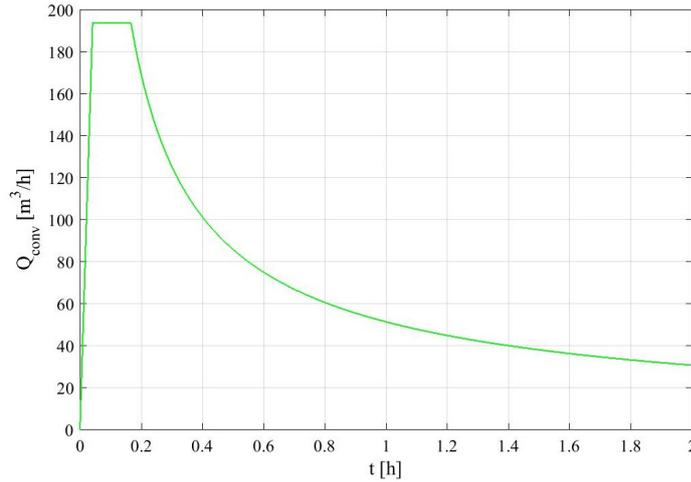


Figura 5.7: Andamento della portata convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

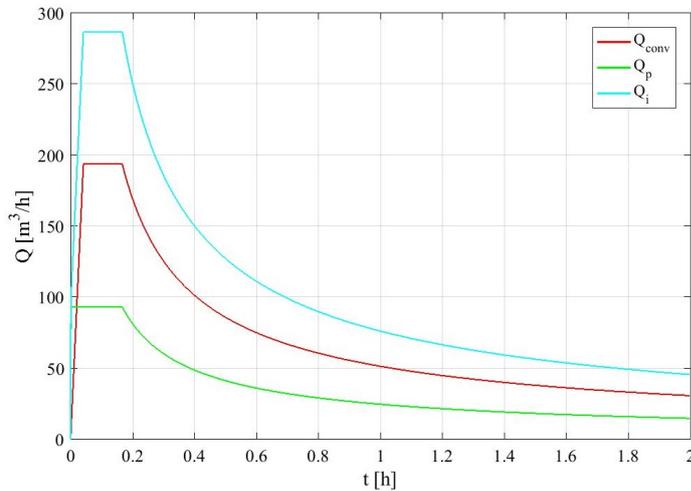


Figura 5.8: Andamento della portata in ingresso Q_i in funzione del tempo, confrontata con la portata convogliata Q_{conv} e la portata di pioggia Q_p (periodo di ritorno = 2 anni)

da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $286.91 m^3/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Valutata la portata in ingresso, si è passati a valutare l'intensità di arrivo sulla base dell'equazione (4.9): l'andamento ottenuto è riportato in Figura 5.9. Partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $0.38 m/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo, è stato necessario esaminare l'andamento della capacità d'infiltrazione, per poterle confrontare e definire il comportamento dell'area verde nel ricevere la portata in ingresso. In questo frangente lo studio si è articolato in due fasi (descritte rispettivamente ai paragrafi 5.3.1 e 5.3.2), nelle quali è stato analizzato l'andamento la portata in uscita, utilizzando l'equazione (4.25).

5.3.1 Prima fase di studio

Nel corso della prima fase dello studio, è stato esaminato l'andamento della portata in uscita dall'area verde considerando la capacità d'infiltrazione pari alla conducibilità idraulica e studiando due diversi casi:

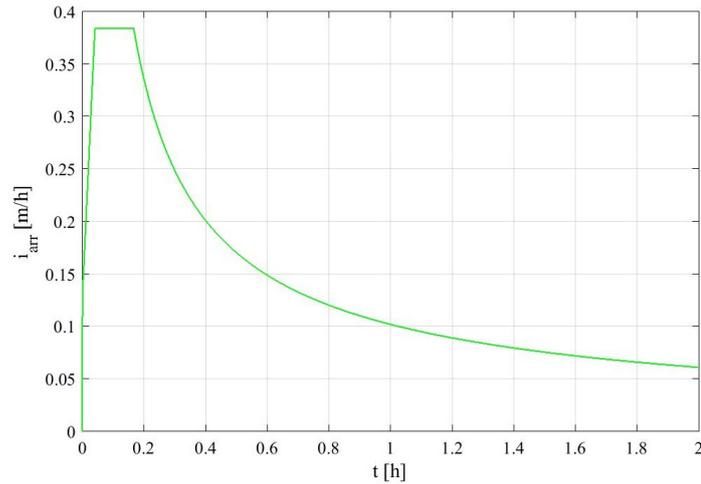


Figura 5.9: Andamento dell'intensità di arrivo in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

- conducibilità idraulica costante e pari al suo valore in condizioni di saturazione (K_{sat})
- conducibilità idraulica variabile nel tempo in funzione del grado di saturazione (K_{unsat})

Per questa prima fase dello studio, si è scelto di fissare il grado di saturazione iniziale (s_0) al valore di 0.2, lo spessore (S) a 0.2 m e il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone (p) a 3 cm. Per quanto concerne la conducibilità idraulica a saturazione, a causa della sua variabilità si è scelto di fissarne il valore a 10^{-5} m/s, giudicato ragionevole e a favore di sicurezza.

In Figura 5.10 viene riportato l'andamento della conducibilità idraulica in funzione del grado di saturazione del mezzo, determinato mediante l'equazione (4.17). Il parametro parte da un valore nullo, in corrispondenza di una saturazione nulla, e cresce fino ad arrivare ad un massimo di 36 m/h, in corrispondenza di una saturazione unitaria.

In un primo momento è stato valutato l'andamento della portata in uscita, considerando la conducibilità idraulica costante e pari al suo valore in condizioni di saturazione. In Figura 5.11 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). L'andamento che assume la portata in uscita è determinato dal fatto che l'intensità di arrivo si mantiene superiore alla conducibilità idraulica a saturazione durante tutto l'arco temporale preso in esame. Andando ad esaminare la curva verde nel dettaglio, si può notare che

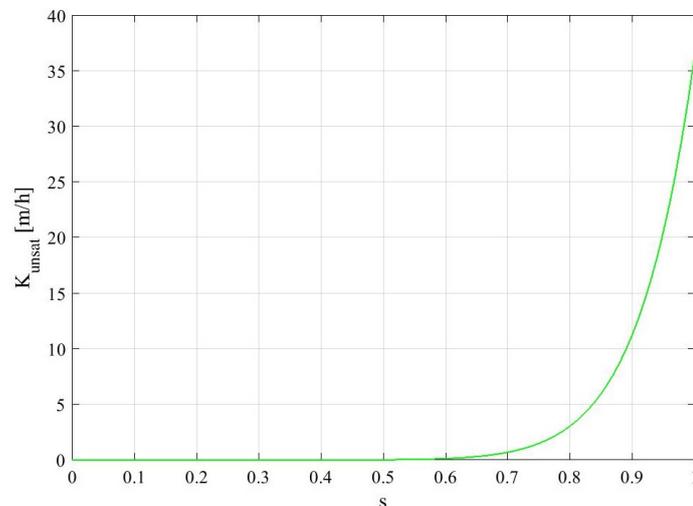


Figura 5.10: Andamento della conducibilità idraulica in funzione del grado di saturazione

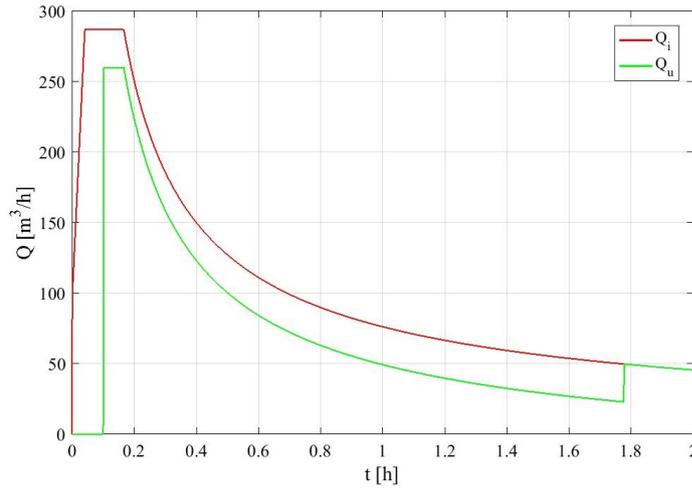


Figura 5.11: Caso di conducibilità idraulica costante: confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0.2, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-5} m/s, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

il parametro si mantiene pari a 0 dall'istante iniziale a circa 6 min, per poi crescere. Questo andamento è giustificato dal fatto che il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno dell'area verde e in parte ad accumularsi su di essa. Lo strato di acqua piovana sulla superficie aumenta progressivamente, fino a superare il bordo dello stramazzo: è da questo istante in poi che la portata in uscita inizia a crescere. Il parametro raggiunge un massimo di $260.04 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione. Durante la fase di decrescita, la portata in uscita presenta un repentino aumento ad 1 h e 47 min circa, corrispondente al momento in cui l'area verde giunge alla condizione di saturazione: il volume in ingresso va quindi a tradursi totalmente in volume accumulato e, di conseguenza, in volume in uscita, essendo esaurito lo spazio disponibile all'interno dei pori. In seguito a questo repentino aumento, la portata in uscita torna a seguire un percorso di decrescita.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $1.69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.2, dove vengono confrontati con quelli conseguiti nel caso successivamente analizzato. In un secondo momento è stato valutato l'andamento della portata in uscita, considerando la conducibilità idraulica variabile nel tempo in funzione del grado di saturazione. Nell'applicare il programma elaborato mediante il software *MATLAB*, si è utilizzato un valore di tolleranza (*toll*) pari a 10^{-10} (vedasi espressione (4.38)). Si tratta di un valore giudicato adatto per poter individuare il raggiungimento della convergenza nel processo di quantificazione della conducibilità idraulica. In Figura 5.12 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). L'andamento che assume la portata in uscita è determinato dal fatto che l'intensità di arrivo si mantiene superiore alla conducibilità idraulica durante tutto l'arco temporale preso in esame. Andando ad esaminare la curva nel dettaglio, si può notare che il parametro si mantiene pari a zero dall'istante iniziale a circa 2 min, per poi crescere. Questo andamento è giustificato dal fatto che il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno

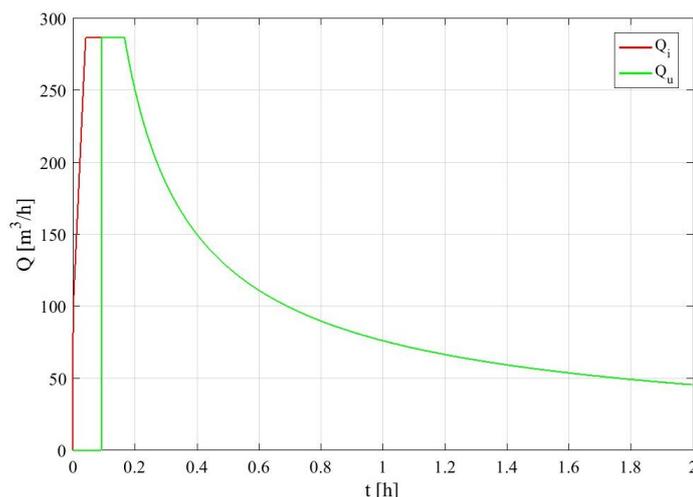


Figura 5.12: Caso di conducibilità idraulica variabile: confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0.2, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-5} m/s, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a $9.25 \cdot 10^{-2}$ h, istante in cui la curva verde si discosta dal valore nullo

del mezzo e in parte ad accumularsi sull'area verde. Lo strato di acqua piovana sulla superficie aumenta progressivamente, fino a superare il bordo dello stramazzo: è da questo istante in poi che la portata in uscita inizia a crescere. Il parametro raggiunge un massimo di $286.91 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione. In questo caso non si giunge alla condizione di saturazione del mezzo, poiché i valori assunti dalla conducibilità idraulica sono troppo piccoli (dell'ordine di 10^{-10} m/h) e il volume infiltrato non riesce ad eguagliare il massimo volume stoccabile.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.28 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.2, dove vengono confrontati con quelli conseguiti nel caso precedentemente analizzato. Effettuando un paragone tra i risultati raggiunti, emerge una marcata differenza tra i due casi presi in considerazione.

Nel primo caso i risultati ottenuti sono stati moderatamente positivi, mettendo in evidenza il

Tabella 5.2: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto tra il caso a conducibilità idraulica costante e quello a conducibilità idraulica variabile (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0.2, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-5} m/s, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

Caso	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
K_{sat}	$1.01 \cdot 10^{-1}$	0.91	70.16	1.78
K_{unsat}	$9.25 \cdot 10^{-2}$	1	22.39	n.d.

ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata in ingresso. Considerando l'entità della portata stessa, la zona verde riesce a bloccarne solo una modesta quota, come evidenziato dal valore assunto dal volume trattenuto. Inoltre il ruolo svolto dall'area verde va a coprire un intervallo di circa $1\ h$ e $47\ min$, che rappresenta il tempo di raggiungimento della saturazione. Si è però ancora lontani dall'obiettivo prefissato, corrispondente alla situazione in cui la zona verde va ad incidere in modo significativo sulla portata in ingresso. Infatti il tempo che la portata in uscita impiega ad instaurarsi è molto basso, pari circa a $6\ min$. Inoltre l'area verde presenta una bassa efficacia nel ridurre il picco della portata in ingresso, come evidenziato dal valore assunto dal tasso di abbattimento.

Nel secondo caso invece i risultati ottenuti sono stati negativi, non evidenziando pressoché alcuna riduzione della portata in ingresso. Infatti l'area verde presenta una capacità d'infiltrazione così ridotta che il suo comportamento è assimilabile a quello di un mezzo impermeabile: tutti i parametri di prestazione dell'area verde risultano perciò inaccettabili rispetto all'obiettivo prefissato. Se da un lato i risultati ottenuti non sono stati soddisfacenti, dall'altro sono state effettuate a priori delle forti approssimazioni in entrambi i casi. Nel primo caso si è trascurato il fatto che l'area verde sia in realtà un mezzo insaturo, eguagliando la conducibilità idraulica al valore che essa assume in condizioni di saturazione. Nel secondo caso invece si è trascurato il fatto che il grado di saturazione sia variabile con la profondità, considerandolo funzione solo del tempo di pioggia. È emersa quindi la necessità di effettuare un ulteriore approfondimento, individuando un modello matematico più preciso nel descrivere il processo d'infiltrazione all'interno dell'area verde.

5.3.2 Seconda fase di studio

Le problematiche emerse nel corso della prima fase di studio hanno sottolineato la necessità di approfondire ulteriormente il modello del processo di infiltrazione all'interno dell'area verde. Si è quindi scelto di far riferimento alla legge di Horton, eguagliando la capacità d'infiltrazione al tasso di infiltrazione potenziale (f_p). In questo frangente è stato necessario affrontare il seguente problema, allo scopo di attribuire un valore al grado di saturazione iniziale (s_0). Il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale (f_0), riportato al paragrafo 5.1, corrisponde ad un grado di saturazione pari a 0. Il grado di saturazione iniziale per un terreno da giardino sabbioso si inserisce però in un range che va da 0.2 a 0.4. Allo scopo di quantificare il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale, è necessario conoscere la relazione tra il parametro stesso e il grado di saturazione per un terreno di tipo sabbioso: è stato quindi ricercato del materiale, senza però reperire documenti pertinenti. Di conseguenza, si è scelto di procedere ipotizzando un grado di saturazione iniziale pari a 0, di cui è noto il corrispondente tasso di infiltrazione potenziale. Sono stati infine ipotizzati uno spessore (S) della zona verde pari a $0.2\ m$ e un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone (p) pari a $3\ cm$.

Nota l'intensità di arrivo, analizzata al paragrafo 5.3, è stato necessario esaminare l'andamento della capacità d'infiltrazione, che è stata eguagliata al tasso di infiltrazione potenziale di Horton. Il risultato ottenuto è riportato in Figura 5.13: il parametro parte da un massimo di $5.84 \cdot 10^{-1}\ m/h$, decresce esponenzialmente all'aumentare del tempo di precipitazione, raggiungendo il valore minimo $4.57 \cdot 10^{-2}\ m/h$ e mantenendosi costante.

Dopo aver determinato la capacità d'infiltrazione, è stato possibile analizzare l'andamento della portata in uscita: in Figura 5.14 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). Dall'istante iniziale a $2\ min$ circa, la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Superato il periodo iniziale di $2\ min$, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte ad accumu-

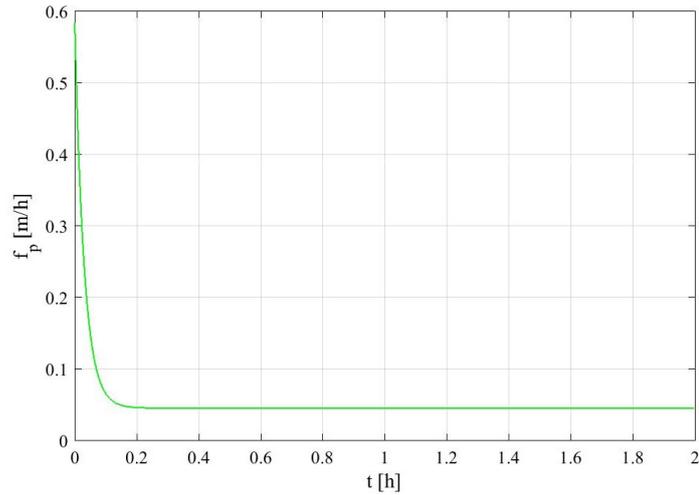


Figura 5.13: Andamento del tasso d'infiltrazione potenziale nel tempo

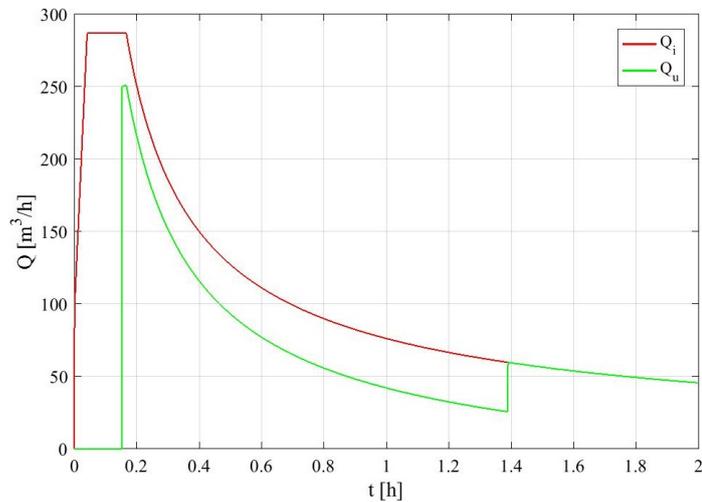


Figura 5.14: Caso di tasso di infiltrazione potenziale di Horton: confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

larsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che aumenta progressivamente nel tempo. Nel momento in cui l'acqua accumulata supera il bordo dello stramazzo, la portata in uscita inizia a crescere. Il parametro raggiunge quindi un massimo di $251.07 \text{ m}^3/\text{h}$ e poi decresce in funzione del tempo di precipitazione. Il repentino aumento che si verifica a 1 h e 30 min circa rappresenta il momento in cui l'area verde raggiunge la saturazione: ne consegue che la portata in ingresso va ad alimentare totalmente quella in uscita. Superato questo istantaneo aumento, la portata in uscita torna a decrescere in funzione del tempo, seguendo l'andamento della portata in ingresso.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.28 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area

Tabella 5.3: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto tra il caso a conducibilità idraulica costante, quello a conducibilità idraulica variabile e quello del tasso di infiltrazione potenziale di Horton (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-5} m/s, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

Caso	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
K_{sat}	$1.02 \cdot 10^{-1}$	0.91	82.11	2.22
K_{unsat}	$9.25 \cdot 10^{-2}$	1	22.39	n.d.
f_p	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	82.11	1.51

verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.3, dove vengono confrontati con quelli conseguiti nella prima fase di studio. Effettuando un paragone tra i risultati, emerge una differenza tra il caso esaminato nella seconda fase di studio e i due esaminati nella prima. In particolare è possibile constatare un miglioramento delle prestazioni dell'area verde, dovuto all'aumento sia del tempo che impiega la portata in uscita ad instaurarsi sia del volume trattenuto dall'area verde. Anche la diminuzione del tasso di abbattimento concorre ad aumentare l'efficacia della zona verde nel ridurre la portata in ingresso. L'unico parametro che presenta un cambiamento in negativo è il tempo di raggiungimento della saturazione, pari a 1 h e 30 min circa: si verifica quindi una riduzione dell'arco temporale durante il quale l'area verde svolge il proprio ruolo.

I risultati ottenuti eguagliando la capacità d'infiltrazione al tasso di infiltrazione potenziale di Horton hanno determinato un generale miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Si è quindi deciso di mantenere questo modello del processo di infiltrazione, effettuando dei confronti al variare dei dati di input. In primo luogo si è scelto di far variare il tempo di ritorno e il grado di saturazione iniziale, esaminando l'influenza di questo cambiamento sulla portata in uscita e, di conseguenza, sui parametri di prestazione dell'area verde. In secondo luogo si è scelto di far variare lo spessore, il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo e la tipologia terreno e si è ipotizzato l'inserimento di materiale alveolare, con l'obiettivo di individuare la configurazione migliore per ridurre la portata in ingresso.

5.3.2.1 Confronto al variare del tempo di ritorno

Il primo confronto è stato effettuato facendo variare il tempo di ritorno (T): sono stati considerati i valori 2 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 10 anni e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sugli andamenti della portata in ingresso e della portata in uscita.

Il primo parametro esaminato è la portata in ingresso (vedasi Figura 5.15): la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 anni, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 anni e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 anni. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in ingresso assume valori progressivamente maggiori. Questo comportamento è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento dell'altezza di pioggia, come si può vedere in Figura 5.3: ne consegue un aumento dell'intensità di pioggia, che a sua volta determina un aumento dei due contributi alla portata in ingresso.

Il secondo parametro esaminato è la portata in uscita (vedasi Figura 5.16): la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 anni, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 anni e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 anni. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in uscita si instaura progressivamente in anticipo ed assume valori maggiori. Questi due fattori determinano anche un anticipo dell'istante di raggiungimento della condizione di saturazione dell'area verde, rappresentata dal repentino aumento che si verifica durante la fase di decrescita del parametro. Il comportamento appena

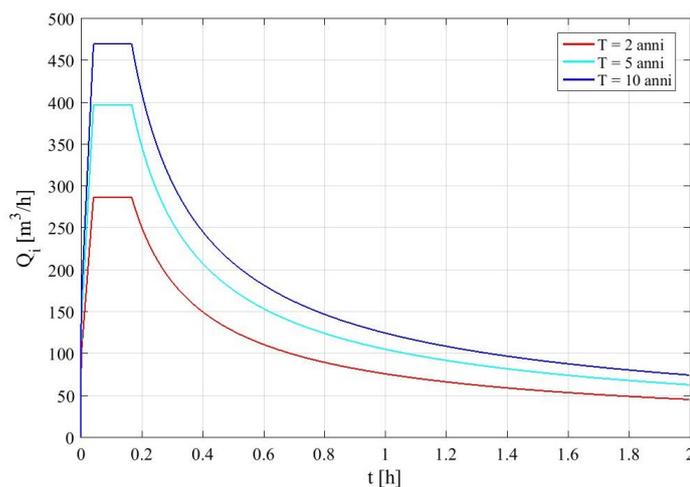


Figura 5.15: Andamento della curva della portata in ingresso Q_i al variare del tempo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

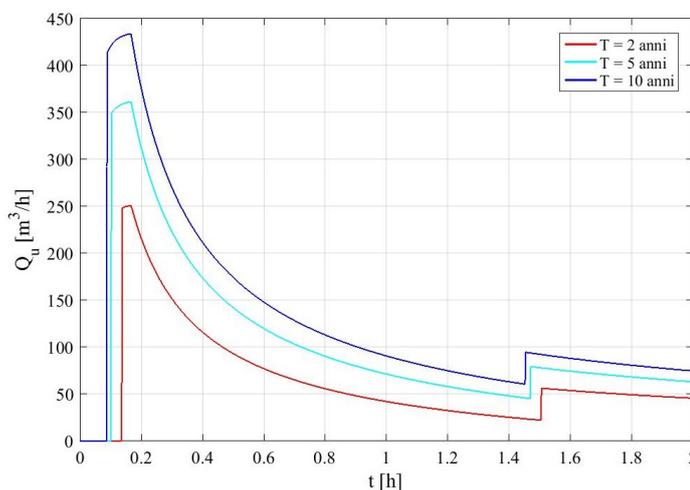


Figura 5.16: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del tempo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a $8.85 \cdot 10^{-2}$ h, istante in cui la curva blu si discosta dal valore nullo; la curva rossa e quella azzurra continuano a coincidere fino a $1.02 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

descritto è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento della portata in ingresso e, di conseguenza, della portata in uscita, che dipende da essa.

I risultati ottenuti per tempi di ritorno di 5 e 10 *anni* sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $3.16 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ e $3.74 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del tempo di ritorno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.4. Effettuando un paragone tra

Tabella 5.4: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del tempo di ritorno (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	82.11	1.51
5	$1.02 \cdot 10^{-1}$	0.91	82.11	1.47
10	$8.85 \cdot 10^{-2}$	0.92	82.11	1.45

i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. L'unico parametro che rimane invariato è il volume trattenuto dall'area verde, su cui il tempo di ritorno non va ad incidere.

5.3.2.2 Confronto al variare del grado di saturazione iniziale

Il secondo confronto è stato effettuato facendo variare il grado di saturazione iniziale: sono stati considerati i valori 0 (corrispondente al caso iniziale) e 0.2 e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sulla portata in uscita.

Per poter valutare il tasso di infiltrazione potenziale corrispondente ad un grado di saturazione pari a 0.2 è stata effettuata un'ipotesi, eguagliandolo alla media tra il valore del tasso di infiltrazione potenziale corrispondente ad un grado di saturazione pari a 0 e il valore costante a cui il tasso di infiltrazione potenziale tende asintoticamente:

$$f_p(t=0) = \frac{f_0 + f_c}{2}$$

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 5.17: la curva rossa corrisponde ad un grado di saturazione iniziale pari a 0 e la curva azzurra ad un grado di saturazione iniziale pari a 0.2. La curva azzurra risulta spostata verso sinistra rispetto alla curva rossa: que-

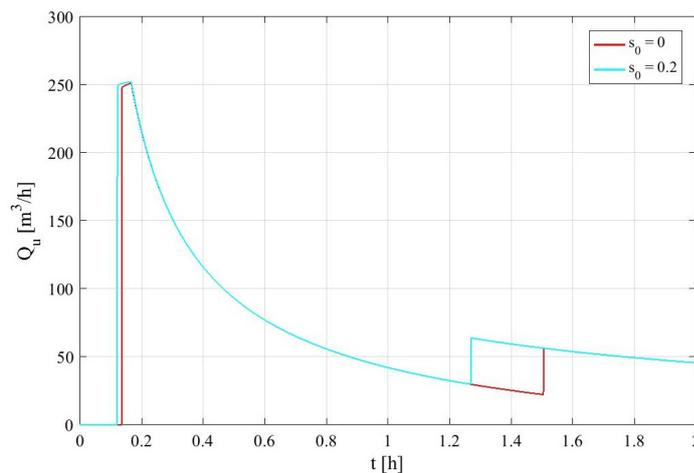


Figura 5.17: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del grado di saturazione iniziale s_0 (periodo di ritorno = 2 anni, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a $1.21 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo. A $1.37 \cdot 10^{-1}$ h anche la curva rossa si discosta dal valore nullo, tornando a coincidere con la curva azzurra. A 1.27 h la curva azzurra si discosta da quella rossa, con la quale torna a coincidere a 1.51 h

Tabella 5.5: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del grado di saturazione iniziale s_0 (periodo di ritorno = 2 anni, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone = 3 cm)

s_0 [-]	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
0	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	82.11	1.51
0.2	$1.21 \cdot 10^{-1}$	0.88	70.16	1.27

sta differenza è legata all'andamento della capacità d'infiltrazione relativa ai due casi esaminati. Infatti per una saturazione iniziale pari a 0.2, il tasso di infiltrazione potenziale presenta un valore iniziale ($f_p(t=0)$) inferiore rispetto a quello presentato per una saturazione iniziale pari a 0 (f_0): ne consegue che l'intensità di arrivo impiega un minor tempo a superare la capacità d'infiltrazione e l'accumulo di acqua piovana sulla superficie inizia in anticipo. Di conseguenza la portata in uscita dall'area verde per un grado di saturazione iniziale pari a 0.2 si instaura prima rispetto al caso relativo ad un grado di saturazione iniziale pari a 0 e questo determina un anticipo del momento in cui viene raggiunta la saturazione dell'area verde, causato anche dalla diminuzione del massimo volume stoccabile.

Il risultato ottenuto per un grado di saturazione iniziale pari a 0.2 è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.28 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è stato possibile valutare l'influenza del grado di saturazione iniziale sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.5. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del grado di saturazione iniziale determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione, sia del volume trattenuto dall'area verde.

5.3.2.3 Confronto al variare dello spessore

Il terzo confronto è stato effettuato facendo variare lo spessore dell'area verde (S) ed esaminando il modo in cui questo cambiamento influisce sulla portata in uscita. Sono stati considerati valori di spessore pari a 0.2 (corrispondente al caso iniziale) e 0.5 m. È stato inoltre esaminato il caso in cui l'area verde non presenti un limite inferiore e non possa giungere alla saturazione: il drenaggio dell'acqua di pioggia continua perciò durante l'intero evento di precipitazione. Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 5 h.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 5.18: la curva rossa corrisponde ad uno spessore di 0.2 m, la curva azzurra ad uno spessore di 0.5 m e la curva blu ad uno spessore illimitato.

Mettendo a confronto in primo luogo la curva azzurra con quella rossa è emerso che, all'aumentare dello spessore dell'area verde, si verifica un ritardo dell'istante in cui l'area verde raggiunge la condizione di saturazione, rappresentato dal repentino aumento della portata in uscita durante la fase di decrescita. In questo frangente però risulta opportuno effettuare due considerazioni.

Innanzitutto è necessario sottolineare che per la curva azzurra, l'area verde raggiunge la saturazione a circa 4 h e 18 min, in ritardo rispetto a quanto si verifica per la curva rossa. Questo comportamento è dovuto al fatto che, aumentando lo spessore della zona verde, aumenta anche il massimo volume stoccabile dalla stessa e quindi il tempo necessario a saturarla.

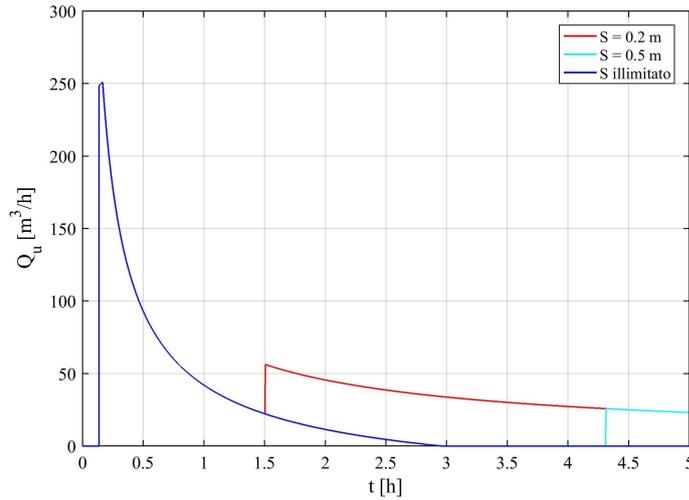


Figura 5.18: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare dello spessore dell'area verde S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a 1.51 h, istante in cui la curva rossa presenta un repentino aumento; la curva blu e quella azzurra continuano a coincidere fino a 4.31 h, istante in cui la curva azzurra presenta un repentino aumento

Inoltre è emerso che all'incirca a 3 h, la portata in uscita per la curva azzurra va ad annullarsi: questo comportamento è dovuto al fatto che, all'istante considerato, la capacità d'infiltrazione torna ad essere superiore all'intensità di arrivo. Ne consegue che tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde e la portata in uscita va quindi ad assumere il valore nullo. In questa fase la capacità d'infiltrazione è tale da permettere all'area verde di assorbire non solo il volume in ingresso ma anche una quota di quello accumulato. Nell'istante in cui la zona verde raggiunge la saturazione, la portata in ingresso va ad alimentare totalmente lo strato d'acqua accumulato sulla superficie. Dal momento che la porzione di volume accumulato che si è infiltrata è ridotta, la lama d'acqua supera subito il bordo dello stramazzo e la portata in uscita subisce un repentino aumento.

Mettendo poi a confronto la curva blu con quella rossa, sono emerse le stesse considerazioni presentate nell'analisi precedente. L'unica differenza rilevata è legata al fatto che, per la curva blu, l'area verde non raggiunge la condizione di saturazione: ne consegue che tutto il volume accumulato viene assorbito e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

I risultati ottenuti sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, sia per uno spessore di 0.5 m che per uno spessore illimitato, è stato rilevato un errore di $2.28 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso nei tre casi analizzati, è stato possibile valutare l'influenza dello spessore sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.6. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto sia del tempo di raggiungimento della saturazione, mentre il tempo in cui si instaura la portata in uscita e il tasso di abbattimento rimangono invariati.

Dal confronto fra i tre casi analizzati, le configurazioni migliori risultano essere quelle in cui lo spessore dell'area verde è rispettivamente pari a 0.5 m e illimitato. In particolare il secondo schema appare il più efficace, poiché non vi è la presenza di uno strato inferiore che limiti il

Tabella 5.6: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	82.11	1.51
0.5	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	171.68	4.31
illim	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	illim	n.d.

Tabella 5.7: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del tempo di ritorno T e dello spessore S (grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

T [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim
2	$1.37 \cdot 10^{-1}$			0.88	171.68	illim	4.31	n.d.
5	$1.02 \cdot 10^{-1}$			0.91	171.68	illim	4.10	n.d.
10	$8.85 \cdot 10^{-2}$			0.92	171.68	illim	4.08	n.d.

volume stoccabile dal mezzo e il processo di infiltrazione continua per tutta la durata della precipitazione.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare le due configurazioni proposte facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 *anni*. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.7. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 5.3.2.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita e un aumento del tasso di abbattimento. Inoltre nel caso di uno spessore pari a 0.5 m, si verifica anche una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, le due soluzioni proposte risultano comunque valide, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato. In particolare la configurazione che presenta uno spessore illimitato viene confermata come la migliore, poichè l'area verde non presenta limiti di volume trattenuto e non raggiunge la condizione di saturazione, anche in caso di aumento del tempo di ritorno. In questo frangente risulta necessario sottolineare che potrebbe non essere consentita la presenza di uno spessore illimitato, ad esempio nel caso in cui l'area sia soggetta a problemi di inquinamento e risulti opportuno inserire uno strato che la limiti inferiormente.

5.3.2.4 Confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo

Il quarto confronto è stato effettuato facendo variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p): sono stati considerati i valori 3 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 7.5 cm e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. Per quanto concerne i valori di dislivello pari a 5 e 7.5 cm, si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato (vedasi paragrafo 5.4). In questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde.

Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 5 h. Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 5.19: la curva rossa corri-

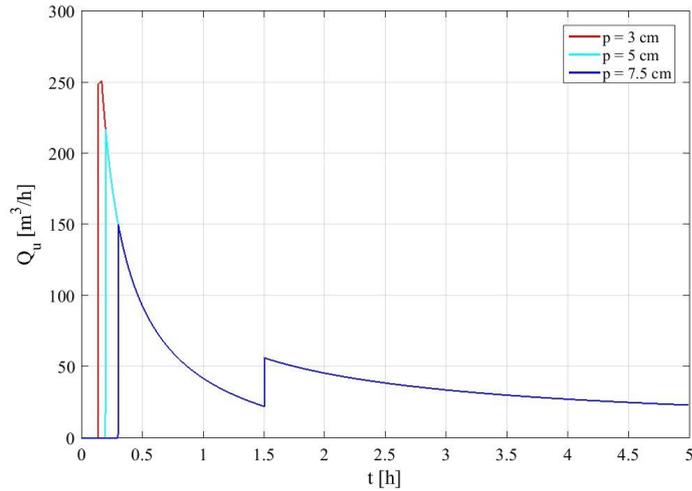


Figura 5.19: Andamento della curva della portata in uscita al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a $1.37 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva rossa si discosta dal valore nullo; la curva azzurra e quella blu continuano a coincidere fino a $1.98 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo e torna a coincidere con la curva rossa. A $3.02 \cdot 10^{-1}$ h la curva blu si discosta dal valore nullo e torna a coincidere con le altre due curve

sponde ad un dislivello di 3 cm, la curva azzurra ad un dislivello di 5 cm e la curva blu ad un dislivello di 7.5 cm. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, aumenta il tempo necessario affinché si instauri la portata in uscita, poiché aumenta il tempo che occorre alla lama d'acqua accumulata per superare il bordo dello stramazzo. Ne consegue quindi un abbassamento del picco della portata in uscita.

I risultati ottenuti per dislivelli di 5 e 7.5 cm sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, in entrambi i casi è stato rilevato un errore di $2.28 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del dislivello sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.8. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del volume trattenuto e del tempo in cui si instaura la portata in uscita. Contemporaneamente si verifica anche una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione resta invariato.

Dal confronto fra i tre casi analizzati, le configurazioni migliori risultano essere quelle in cui il

Tabella 5.8: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

p [cm]	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
3	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	82.11	1.51
5	$1.98 \cdot 10^{-1}$	0.75	97.04	1.51
7.5	$3.02 \cdot 10^{-1}$	0.52	115.70	1.51

Tabella 5.9: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S e del dislivello p (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$p=5$ cm	$=7.5$ cm	$p=5$ cm	$=7.5$ cm	$p=5$ cm	$=7.5$ cm	$p=5$ cm	$=7.5$ cm
0.2	$1.98 \cdot 10^{-1}$	$3.02 \cdot 10^{-1}$	0.75	0.52	97.04	115.70	1.51	
0.5	$1.98 \cdot 10^{-1}$	$3.02 \cdot 10^{-1}$	0.75	0.52	115.70	205.27	4.31	
illim	$1.98 \cdot 10^{-1}$	$3.02 \cdot 10^{-1}$	0.75	0.52	illim		n.d.	

dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo è pari rispettivamente a 5 e 7.5 cm. In particolare il secondo schema appare il più efficace, poiché riduce in modo significativo il picco della portata in ingresso.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare le due configurazioni facendo variare lo spessore dell'area verde (S) a partire da 0.2 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.9. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 5.3.2.3). Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde sia del tempo di raggiungimento della saturazione. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è illimitato e il dislivello è pari a 7.5 cm. Per lo stesso problema già presentato al paragrafo 5.3.2.3, potrebbe però non essere consentita la presenza di uno spessore illimitato. Dal confronto effettuato sui risultati ottenuti, appare evidente che anche con uno spessore di 0.5 m la configurazione risulta efficace.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare le configurazioni proposte facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.10. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 5.3.2.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita e un aumento del tasso di abbattimento. Inoltre nel caso di uno spessore pari a 0.5 m, si verifica anche una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, le due soluzioni proposte risultano comunque valide, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato. In particolare la configurazione che presenta uno spessore illimitato viene confermata come la migliore, poiché l'area verde non presenta limiti di volume trattenuto e non raggiunge la condizione di saturazione, anche in caso di aumento del tempo di ritorno.

Tabella 5.10: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T e dello spessore S (grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 7.5 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

T [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$S=0.5$ cm	S illim	$S=0.5$ cm	S illim	$S=0.5$ cm	S illim	$S=0.5$ cm	S illim
2	$3.02 \cdot 10^{-1}$			0.52	205.27	illim	4.13	n.d.
5	$1.98 \cdot 10^{-1}$			0.79	205.27	illim	4.10	n.d.
10	$1.67 \cdot 10^{-1}$			0.92	205.27	illim	4.08	n.d.

5.3.2.5 Confronto al variare della tipologia di terreno

Il quinto confronto è stato effettuato facendo variare la tipologia di terreno: si è quindi ipotizzato di sostituire la sabbia con la ghiaia (vedasi paragrafo 3.3.2), analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. In questo frangente lo studio si è articolato in due fasi, nelle quali è stato analizzato l'andamento della portata in uscita eguagliando la capacità d'infiltrazione della ghiaia prima al tasso d'infiltrazione potenziale di Horton (f_p) e poi alla conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}).

Dopo aver consultato diverse fonti, si è scelto di assegnare alla porosità (ϕ) del terreno ghiaioso il valore di 0.45 [3].

Prima fase di studio Nel corso della prima fase di analisi, si è scelto di eguagliare la capacità d'infiltrazione della ghiaia al tasso d'infiltrazione potenziale di Horton (f_p). Sono state consultate diverse fonti, allo scopo di reperire i valori da assegnare ai parametri del modello di Horton (f_0 , f_c e k) di un terreno ghiaioso. All'interno del materiale ricercato, non sono però stati trovati documenti pertinenti alla tipologia di terreno scelta. Si è quindi deciso di approssimare la ghiaia ad una sabbia con medio impasto e sassolini presente sulla pianura costiera della Georgia, negli Stati Uniti [6], individuando i seguenti valori:

- $f_0 = 158.5 \text{ mm/h}$
- $f_c = 61.5 \text{ mm/h}$
- $k = 4.70 \text{ h}^{-1}$

In Figura 5.20 viene riportato l'andamento della capacità d'infiltrazione per un terreno ghiaioso: il parametro parte da un massimo di $1.58 \cdot 10^{-1} \text{ m/h}$, decresce esponenzialmente all'aumentare del tempo di precipitazione, raggiungendo il valore minimo $6.15 \cdot 10^{-2} \text{ m/h}$ e mantenendosi costante.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 5.21: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno ghiaioso. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla tipologia di terreno. In questo frangente è necessario esaminare il comportamento di un terreno ghiaioso, dal momento che quello di un terreno sabbioso è stato analizzato in precedenza.

Considerando quindi un terreno ghiaioso, per i primi 14 sec circa la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno

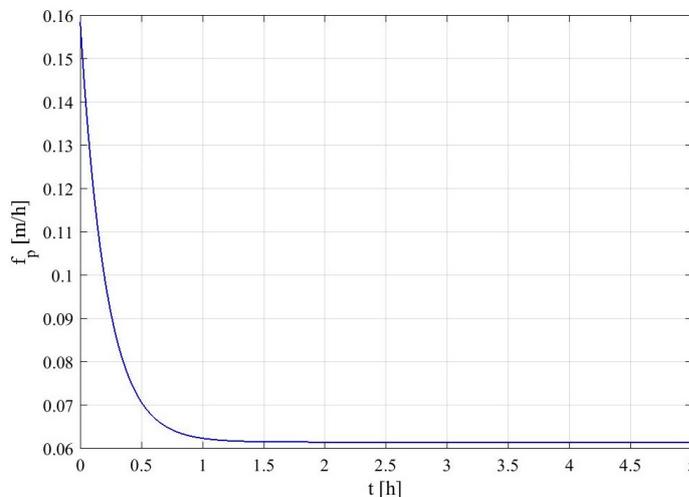


Figura 5.20: Andamento del tasso d'infiltrazione potenziale nel tempo (ghiaia)

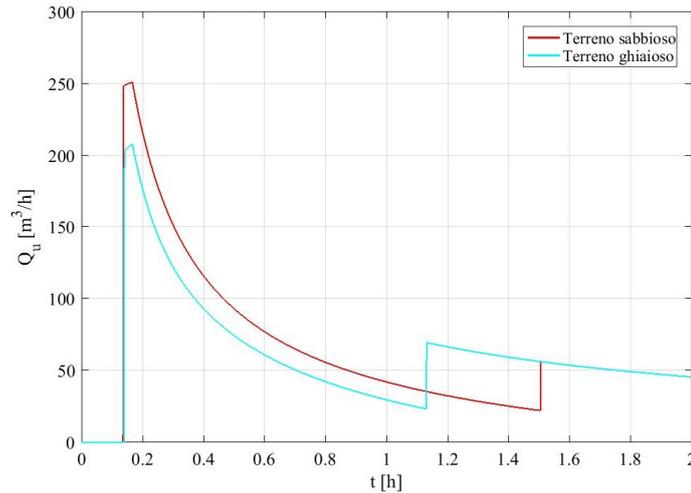


Figura 5.21: *Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare della tipologia di terreno (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Si può notare che le due curve coincidono fino a $1.36 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo. Le due curve tornano a coincidere a 1.51 h, istante in cui la curva rossa subisce un repentino aumento*

dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo. Superato questo brevissimo periodo iniziale, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte va ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che cresce progressivamente nel tempo. Nel momento in cui l'acqua accumulata supera il bordo dello stramazzo, la portata in uscita inizia a crescere.

Riprendendo quanto analizzato in precedenza, un terreno sabbioso si comporta in modo analogo, ma la capacità d'infiltrazione impiega più tempo a superare l'intensità di arrivo. Nonostante questa differenza, per cui l'accumulo di acqua piovana inizia in anticipo per un terreno ghiaioso, la portata in uscita per un terreno sabbioso inizia a crescere prima. Questo comportamento è spiegato dal fatto che per un terreno sabbioso, la capacità d'infiltrazione decresce più repentinamente e, di conseguenza, lo strato accumulato cresce più velocemente rispetto a quanto accade per un terreno ghiaioso. La curva rossa inizia quindi a crescere in anticipo rispetto alla curva azzurra: ne consegue che il picco raggiunto dalla prima è maggiore rispetto a quello raggiunto dalla seconda.

Il comportamento appena descritto porta un terreno ghiaioso ad assorbire una quota maggiore del volume in ingresso rispetto ad un terreno sabbioso e a raggiungere prima la condizione di saturazione, rappresentata dal repentino aumento della portata in uscita durante la fase di decrescita. Questo anticipo dell'istante di raggiungimento della saturazione si verifica nonostante il terreno ghiaioso presenti una maggior porosità, che determina un aumento del massimo volume stoccabile.

I risultati ottenuti in presenza di terreno ghiaioso sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.28 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della tipologia di terreno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_i) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}).

Tabella 5.11: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare della tipologia di terreno (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

Materiale	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
Sabbia	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	82.11	1.51
Ghiaia	$1.41 \cdot 10^{-1}$	0.72	89.57	1.13

I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.11. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che la sostituzione del terreno sabbioso con uno ghiaioso determina un moderato miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde. Contemporaneamente, si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione diminuisce.

Dal confronto tra i due casi analizzati si è potuto constatare che la presenza di un terreno ghiaioso non comporta una variazione tangibile dei parametri di prestazione dell'area verde: questo è dovuto all'ipotesi avanzata all'inizio, secondo cui la ghiaia è approssimabile ad una sabbia con medio impasto e sassolini. In questo frangente, è risultato quindi necessario effettuare una valutazione più approfondita dell'approccio adottato. Si è potuto appurare che il tasso di infiltrazione potenziale non rappresenta al meglio la capacità di infiltrazione di un terreno ghiaioso: infatti la legge di Horton tiene in considerazione il verificarsi di processi di risalita capillare all'interno del suolo, che però tipicamente non si realizzano nel caso di una ghiaia. In questo caso quindi la legge di Horton risulta eccessivamente conservativa e si è ritenuto opportuno eguagliare la capacità d'infiltrazione alla conducibilità idraulica a saturazione, un approccio più adatto per un terreno di tipo ghiaioso, nonostante le limitazioni esaminate al paragrafo 5.3.1.

Seconda fase di studio Nel corso della seconda fase di analisi, si è scelto di eguagliare la capacità d'infiltrazione della ghiaia alla conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}). Sono state consultate diverse fonti, allo scopo di reperire il valore da assegnare al parametro esaminato: si è appurato che la conducibilità idraulica a saturazione di una ghiaia varia in un range da $3 \cdot 10^{-4}$ a $3 \cdot 10^{-2}$ m/s [7]. Si è scelto di fissare il valore del parametro a 10^{-4} m/s, mantenendosi a favore di sicurezza.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 5.22: la curva azzurra corrisponde al caso in cui la capacità d'infiltrazione è eguagliata al tasso di infiltrazione potenziale di Horton (corrispondente al caso precedentemente analizzato) mentre la curva blu al caso in cui la capacità d'infiltrazione è eguagliata alla conducibilità idraulica a saturazione. Dal confronto tra le due curve è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla tipologia di approccio scelto. In questo frangente è necessario esaminare il comportamento nel caso in cui la capacità d'infiltrazione è eguagliata alla conducibilità idraulica a saturazione, dal momento che il caso in cui la capacità d'infiltrazione è eguagliata al tasso di infiltrazione potenziale di Horton è stato analizzato in precedenza.

Considerando quindi la curva blu, per i primi 2 min circa la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Superato questo periodo iniziale, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte va ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che cresce progressivamente nel tempo.

Dopo 10 min dall'inizio dell'analisi, la capacità d'infiltrazione torna ad essere superiore all'intensità d'arrivo: il volume precedentemente accumulato viene quindi assorbito e contemporanea-

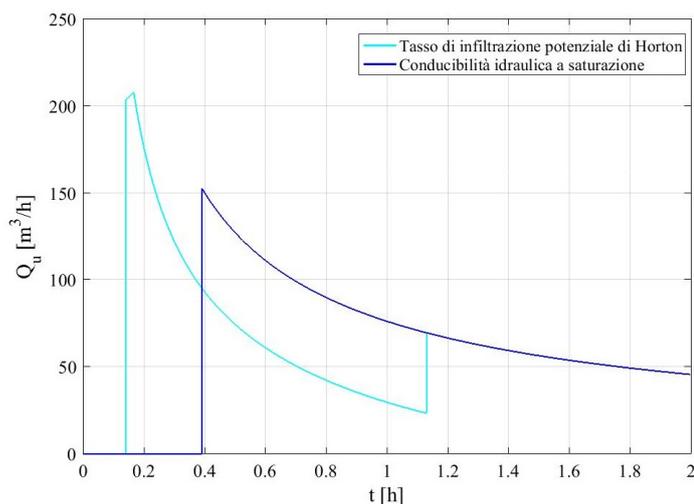


Figura 5.22: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare della tipologia di approccio di quantificazione della capacità d'infiltrazione della ghiaia (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-4} m/s). Si può notare che le due curve coincidono fino a $1.41 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo. Le due curve tornano a coincidere a 1.13 h, istante in cui la curva azzurra subisce un repentino aumento

mente tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, che raggiunge la condizione di saturazione. Da questo momento in poi, il volume in ingresso inizia ad accumularsi sulla superficie verde, fino a raggiungere il bordo dello stramazzo e a determinare l'instaurarsi di una portata in uscita.

La capacità d'infiltrazione relativa alla curva blu risulta sempre superiore a quella relativa alla curva azzurra: ne consegue che per la curva blu l'area verde raggiunge la condizione di saturazione in anticipo rispetto a quanto avviene per la curva azzurra.

Dall'altra parte però, in base alle dinamiche precedentemente descritte, la portata in uscita si instaura prima per la curva azzurra e poi per la curva blu: di conseguenza, il picco raggiunto dalla curva blu risulta minore rispetto a quello raggiunto dalla curva azzurra.

Il risultato ottenuto eguagliando la capacità d'infiltrazione alla conducibilità idraulica a saturazione è stato validato dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.28 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza dell'approccio di valutazione della capacità d'infiltrazione sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.12. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che il cambiamento di approccio determina un moderato miglioramento delle prestazioni dell'area verde, legato alla diminuzione del tasso di abbattimento. Dall'altra parte però si verifica una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione.

Sulla base delle considerazioni emerse nel corso dello studio, si è scelto come approccio migliore quello in cui la capacità d'infiltrazione viene eguagliata alla conducibilità idraulica a saturazione. È stato quindi effettuato un confronto al variare della conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}): sono stati considerati i valori 10^{-4} (corrispondente al caso precedentemente analizzato) e 10^{-2} m/s. Contemporaneamente è stato fatto variare il tempo di ritorno (T), considerando i va-

Tabella 5.12: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare della tipologia di approccio di quantificazione della capacità d'infiltrazione della ghiaia (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-4} m/s)

Caso	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
f_p	$1.41 \cdot 10^{-1}$	0.72	89.57	1.13
K_{sat}	$3.92 \cdot 10^{-1}$	0.53	89.57	$2.65 \cdot 10^{-1}$

lori 2, 5 e 10 anni. Si è analizzato il modo in cui questi cambiamenti influiscono sulla prestazione offerta dall'area verde, calcolando i parametri al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.13. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che, per un tempo di ritorno di 2 anni, il cambiamento della conducibilità idraulica a saturazione non influisce sulla prestazione offerta dall'area verde. Entrambi i valori di capacità d'infiltrazione si mantengono superiori all'intensità di arrivo per tutto il tempo dell'analisi: si verifica solo un'eccezione nel caso in cui la conducibilità idraulica a saturazione è pari a 10^{-4} m/s. Infatti riprendendo quanto indicato in precedenza, in quest'ultimo caso si può individuare un intervallo temporale iniziale in cui l'intensità di arrivo supera la capacità d'infiltrazione: questo arco temporale è però così breve che l'acqua accumulata non riesce a superare il bordo dello stramazzo e viene in seguito assorbita. Aumentando però il tempo di ritorno, si verifica un aumento dell'intensità di arrivo e, di conseguenza, un ampliamento dell'arco temporale durante cui quest'ultimo parametro supera la capacità d'infiltrazione: ne consegue che lo strato d'acqua accumulato riesce a superare il bordo dello stramazzo. Si può così constatare che, per tempi di ritorno di 5 e 10 anni, l'aumento della conducibilità idraulica a saturazione determina un moderato peggioramento della prestazione offerta dall'area verde: si verifica infatti una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione e, contemporaneamente, un aumento del tasso di abbattimento. La modesta variazione dei parametri di prestazione dell'area verde giustifica quindi la scelta di analizzare la zona stessa eguagliando la conducibilità idraulica a saturazione a 10^{-4} m/s, valore ragionevole e a favore di sicurezza.

Ricerca della configurazione migliore A seguito dell'analisi fin qui effettuata, appare evidente un miglioramento delle prestazioni dell'area verde dovuto alla sostituzione della sabbia con la ghiaia: fra le due configurazioni esaminate, quest'ultima risulta quindi la migliore. Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare lo spessore dell'area verde da 0.2 m a 0.5 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.14. Effettuando un pa-

Tabella 5.13: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare della conducibilità idraulica a saturazione K_{sat} e del tempo di ritorno T (terreno ghiaioso, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

T [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$K_{sat}=10^{-4}$ m/s	$=10^{-2}$ m/s	$K_{sat}=10^{-4}$ m/s	$=10^{-2}$ m/s	$K_{sat}=10^{-4}$ m/s	$=10^{-2}$ m/s	$K_{sat}=10^{-4}$ m/s	$=10^{-2}$ m/s
2	$3.92 \cdot 10^{-1}$		0.53		89.57		$2.65 \cdot 10^{-1}$	
5	$2.25 \cdot 10^{-1}$	$2.52 \cdot 10^{-1}$	0.73	0.74	89.57		$2.56 \cdot 10^{-1}$	$1.84 \cdot 10^{-1}$
10	$1.40 \cdot 10^{-1}$	$2.08 \cdot 10^{-1}$	0.73	0.85	89.57		$2.54 \cdot 10^{-1}$	$1.58 \cdot 10^{-1}$

Tabella 5.14: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (terreno ghiaioso, tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-4} m/s)

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$3.92 \cdot 10^{-1}$	0.53	89.57	$2.65 \cdot 10^{-1}$
0.5	1.58	0.19	190.34	1.21

Tabella 5.15: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (terreno ghiaioso, periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-4} m/s)

p [cm]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
3	1.58	0.19	190.34	1.21
5	1.88	0.17	205.27	1.21
7.5	2.30	0.14	223.93	1.21

ragione tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 5.3.2.3). Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde, sia del tempo di raggiungimento della saturazione e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m.

Allo scopo di migliorarla ulteriormente, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo da 3 a 7.5 cm. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.15. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde. Contemporaneamente, si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione si mantiene costante. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m e il dislivello fra terreno e bordo dello stramazzo è pari a 7.5 cm.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.16. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 5.3.2.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Tabella 5.16: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (terreno ghiaioso, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 7.5 cm)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	2.30	0.14	223.93	1.21
5	1.12	0.25	223.93	$6.44 \cdot 10^{-1}$
10	$8.03 \cdot 10^{-1}$	0.31	223.93	$6.29 \cdot 10^{-1}$

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

5.3.2.6 Confronto in presenza di materiale alveolare

Il sesto confronto è stato effettuato inserendo uno strato di materiale alveolare (avente una porosità pari a 0.9 [7]) al di sotto di uno strato di terreno sabbioso (vedasi paragrafo 3.3.3) ed analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. In questo frangente è ancora il terreno sabbioso a determinare il processo di infiltrazione: la presenza del materiale alveolare influenza solo il valore del massimo volume stoccabile, causandone un aumento.

È stato effettuato un confronto fra il caso in cui vi siano 0.20 m di terreno sabbioso rispetto a quello in cui vi siano 0.15 m di terreno sabbioso (valore minimo affinché possa essere mantenuto un tappeto erboso) sovrastanti 0.05 m di materiale alveolare. Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 4 h.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 5.23: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno sabbioso sovrastante del materiale alveolare. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla presenza del materiale alveolare, che determina un aumento del massimo volume stoccabile: ne consegue un ritardo dell'istante in cui l'area verde giunge alla condizione di saturazione.

I risultati ottenuti in presenza del materiale alveolare sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $1.37 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della presenza del materiale alveolare sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di

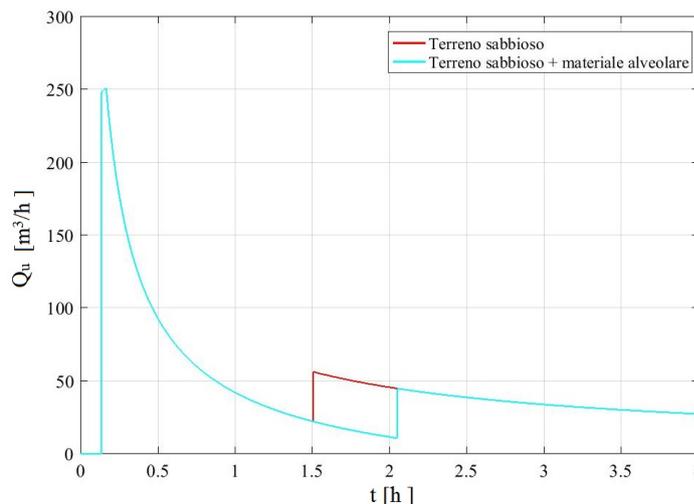


Figura 5.23: Andamento della curva della portata in uscita in presenza di materiale alveolare (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone = 3 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m. Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a 1.51 h, istante in cui la curva rossa presenta un repentino aumento; nell'istante in cui anche la curva azzurra presenta un repentino aumento, le due curve tornano a coincidere

Tabella 5.17: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto in presenza di materiale alveolare (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m

Materiale alveolare	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
No	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	82.11	1.51
Si	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	100.77	2.05

abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.17. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aggiunta di materiale alveolare determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. Il tempo in cui si instaura la portata in uscita e il tasso di abbattimento rimangono invece invariati.

Dal confronto fra i due casi analizzati, la configurazione migliore risulta quella in cui è presente uno strato di materiale alveolare.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare lo spessore dell'area verde da 0.2 m a 0.5 m. Si è mantenuto pari a 0.15 m lo spessore dello strato di sabbia, mentre si è fatto variare lo spessore del sottostante strato di materiale alveolare da 0.05 a 0.35 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.18. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 5.3.2.3). Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m.

Allo scopo di migliorarla ulteriormente, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo da 3 a 7.5 cm. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.19. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi 5.3.2.4). Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde. Contemporaneamente si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento mentre il tempo di raggiungimento della saturazione si mantiene costante. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui è presente materiale alveolare di spessore pari a 0.35 m e il dislivello fra terreno e bordo dello stramazzo è aumentato a 7.5 cm.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 5.20. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 5.3.2.1). Infatti si

Tabella 5.18: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (presenza di materiale alveolare, tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso resta fisso a 0.15 m, mentre viene fatto variare lo spessore del materiale alveolare da 0.05 m a 0.35 m

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	100.77	2.05
0.5	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	302.31	10.25

Tabella 5.19: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (presenza di materiale alveolare, periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre lo spessore del materiale alveolare è pari 0.35 m

p [cm]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
3	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	100.77	2.05
5	$1.99 \cdot 10^{-1}$	0.76	317.24	9.20
7.5	$3.03 \cdot 10^{-1}$	0.52	335.90	8.00

Tabella 5.20: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (presenza di materiale alveolare, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 7.5 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre lo spessore del materiale alveolare è pari 0.35 m

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	$3.03 \cdot 10^{-1}$	0.52	335.90	8.00
5	$1.98 \cdot 10^{-1}$	0.79	335.90	7.93
10	$1.67 \cdot 10^{-1}$	0.92	335.90	7.91

verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

5.4 Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 5.3.2.4, è stata analizzata la possibilità di innalzare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo a 5 e a 7.5 cm. In questo frangente, si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato: in questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde. Sono state quindi ipotizzate due possibili collocazioni dello scarico: all'estremità superiore e all'estremità inferiore dell'area verde. Per entrambi i casi scelti, è stato individuato il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) e la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), in base alla quale è stata applicata l'equazione (4.27) ed è stato stimato il diametro (ϕ_{luce}).

Bocca di scarico collocata all'estremità superiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità superiore dell'area verde, è necessario far riferimento alla legge di efflusso da una luce a battente (vedasi paragrafo 4.4.1).

Si è quindi ipotizzato che il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) sia pari a 2 h e si è applicata l'equazione (4.31) per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}). Sono stati considerati valori di dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) pari a 5 e 7.5 cm, conseguendo i risultati riportati in Tabella 5.21. Sulla base dei valori ottenuti, è stato quindi possibile quantificare il diametro della bocca di scarico (ϕ_{luce}): ne consegue che la presenza di un dislivello di 5 cm richiede un diametro di 15 cm, mentre la presenza di un dislivello di 7.5 cm richiede un diametro di 16 cm.

Tabella 5.21: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità superiore dell'area verde. Si è fatto variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p)

Parametro	$p=5\text{ cm}$	$p=7.5\text{ cm}$
$\Omega_{luce}\text{ [m]}$	$1.72 \cdot 10^{-2}$	$1.72 \cdot 10^{-2}$
$\phi_{luce}\text{ [cm]}$	14.78	16.36

Tabella 5.22: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità inferiore dell'area verde. Si è fatto variare sia il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p), sia lo spessore dell'area verde (S)

Parametro	$p=5\text{ cm}$		$p=7.5\text{ cm}$	
	$S=0.2\text{ m}$	$S=0.5\text{ m}$	$S=0.2\text{ m}$	$S=0.5\text{ m}$
$t_{svuot}\text{ [h]}$	0.98	1.04	1.39	1.53
$\Omega_{luce}\text{ [m]}$	$3.52 \cdot 10^{-2}$	$3.29 \cdot 10^{-2}$	$2.46 \cdot 10^{-2}$	$2.25 \cdot 10^{-2}$
$\phi_{luce}\text{ [cm]}$	21.16	20.47	17.71	16.91

Bocca di scarico collocata all'estremità inferiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità inferiore dell'area verde, è necessario tenere in considerazione non soltanto il processo di efflusso attraverso di essa ma anche il processo di infiltrazione all'interno del terreno (vedasi paragrafo 4.4.2).

Risulta quindi indispensabile far riferimento sia alla legge di efflusso da una luce a battente, sia alla legge di Darcy. Si è calcolato in primo luogo il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}), utilizzando la legge di Darcy (vedasi equazione 4.35) ed eguagliando la conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}) al parametro f_c del modello Horton. Il valore ottenuto è stato quindi a sua volta adoperato per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), utilizzando la legge di efflusso da una luce a battente. Sono stati considerati valori di dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) pari a 5 e 7.5 cm e valori di spessore dell'area verde (S) pari a 0.2 e 0.5 m, conseguendo i risultati riportati in Tabella 5.22. Sulla base dei valori ottenuti, è stato quindi possibile quantificare il diametro della bocca di scarico (ϕ_{luce}). Ne consegue che la presenza di un dislivello pari a 5 cm richiede un diametro di 21 cm sia per uno spessore di 0.2 m, sia per uno spessore di 0.5 m. Invece la presenza di un dislivello pari a 7.5 cm richiede un diametro di 18 cm per uno spessore di 0.2 m e un diametro di 17 cm per uno spessore di 0.5 m.

5.5 Conclusioni

Dopo aver analizzato in modo approfondito l'area verde A, è stato possibile individuare le configurazioni migliori allo scopo di ridurre in modo significativo la portata in ingresso. In particolare sono state effettuate delle prove facendo variare una parte dei dati di input del programma, con l'obiettivo di esaminarne gli effetti sull'andamento della portata in uscita e, di conseguenza, sulle prestazioni della zona verde esaminata.

Si è potuto constatare che l'aumento del tempo di ritorno e del grado di saturazione iniziale determinano un peggioramento della prestazione offerta dall'area verde. In entrambi i casi infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. Nel secondo caso si verifica anche una diminuzione del volume trattenuto dall'area verde.

Si è inoltre potuto constatare che l'aumento dello spessore e del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo determinano un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. In entrambi i casi infatti si verifica un aumento del volume trattenuto dall'area verde: nel primo caso si realizza anche un aumento del tempo di raggiungimento della saturazione, mentre nel secondo

Tabella 5.23: Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno spessore di 0.5 m oppure, dove possibile, illimitato (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.5	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	171.68	4.31
illim	$1.37 \cdot 10^{-1}$	0.88	illim	n.d.

Tabella 5.24: Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti un dislivello di 7.5 cm e uno spessore di 0.5 m oppure, dove possibile, illimitato (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.5	$3.02 \cdot 10^{-1}$	0.52	205.27	4.31
illim	$3.02 \cdot 10^{-1}$	0.52	illim	n.d.

caso un aumento del tempo in cui si instaura la portata in uscita e una diminuzione del tasso di abbattimento.

Infine si è osservato che anche la variazione della tipologia di terreno e l'inserimento di materiale alveolare determinano un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. Nel caso in cui si sostituisca il terreno sabbioso con uno ghiaioso, si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. Invece nel caso in cui si aggiunga del materiale alveolare, si verifica un aumento del volume trattenuto e del tempo di raggiungimento della saturazione.

Dopo aver effettuato diverse prove al variare dei dati di input, sono state individuate le configurazioni migliori per raggiungere l'obiettivo di ridurre in modo significativo la portata in ingresso. La prima configurazione proposta presenta uno spessore illimitato, che consente all'area verde di assorbire l'acqua di pioggia per tutta la durata dell'evento, senza raggiungere la condizione di saturazione. Questa soluzione però non è sempre realizzabile, per le problematiche espresse al paragrafo 5.3.2.3: in questo frangente si può considerare ottimale una configurazione che presenti uno spessore pari a 0.5 m.

In Tabella 5.23 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, per uno spessore sia pari a 0.5 m sia illimitato.

La seconda configurazione proposta presenta un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo pari a 7.5 cm, che consente all'area verde di abbattere notevolmente il picco della portata in ingresso. In questo caso si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata al di sotto della superficie verde che, in seguito all'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato.

Combinare questa soluzione con un aumento dello spessore consente poi di ottenere risultati ulteriormente positivi per quanto concerne la prestazione offerta dall'area verde. In questo ambito occorre però tenere nuovamente in considerazione le problematiche che potrebbero emergere nel caso in cui lo spessore sia illimitato, sottolineando che anche in presenza di uno spessore pari a 0.5 m possono essere raggiunti risultati ulteriormente positivi.

In Tabella 5.24 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde per un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm, considerando uno spessore sia pari a 0.5 m sia illimitato.

Tabella 5.25: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui sia presente un terreno ghiaioso spesso 0.5 m e un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, conducibilità idraulica a saturazione = 10^{-4} m/s)*

t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
2.30	0.14	223.93	1.21

Tabella 5.26: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno strato di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m, e un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)*

t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
$3.02 \cdot 10^{-1}$	0.52	354.56	13.61

La terza configurazione proposta prevede di sostituire il terreno sabbioso con un terreno ghiaioso spesso 0.5 m: questa soluzione consente sia di abbattere il picco, sia di trattenere una quota significativa della portata in ingresso.

Combinare questa soluzione con un aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo consente poi di ottenere risultati ulteriormente positivi per quanto concerne la prestazione offerta dall'area verde. In particolare portare il dislivello a 7.5 cm rappresenta la configurazione più valida in questo ambito.

In Tabella 5.25 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, in presenza di terreno ghiaioso spesso 0.5 m e di un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm.

La quarta configurazione proposta prevede di inserire uno strato di materiale alveolare di spessore pari a 0.35 m al di sotto di uno strato di terreno sabbioso di spessore pari a 0.15 m: questa soluzione consente all'area verde di trattenere una quota significativa della portata in ingresso, raggiungendo la condizione di saturazione dopo un tempo notevolmente lungo.

Combinare questa soluzione con un aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo consente poi di ottenere risultati ulteriormente positivi per quanto concerne la prestazione offerta dall'area verde. In particolare portare il dislivello al valore di 7.5 cm rappresenta la configurazione più valida in questo ambito.

In Tabella 5.26 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, in presenza di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m. Viene inoltre considerato un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm.

Le configurazioni proposte nell'ambito del presente capitolo sottolineano quindi l'importanza del ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata che, in sua assenza, entrerebbe direttamente all'interno della rete fognaria bianca.

Capitolo 6

Area verde B

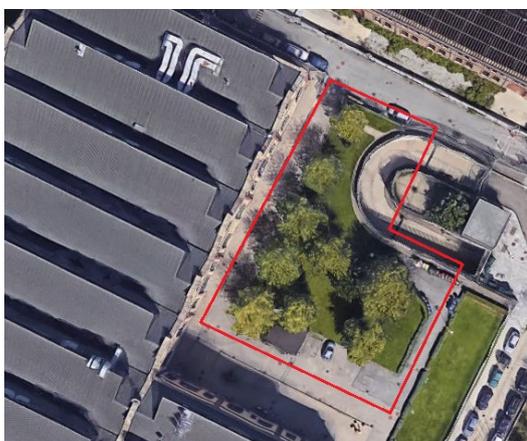
Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi dell'area verde A (vedasi capitolo 5), l'attenzione si è focalizzata su una seconda zona verde, corrispondente all'area verde B indicata al paragrafo 3.3. Essa è situata all'interno della Cittadella del Politecnico di Torino, fra l'Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione (SiTI), la Mensa Universitaria Castelfidardo e l'area verde A. In Figura 6.1(a) ne viene riportata una foto aerea (in cui l'area verde è delimitata da una linea rossa), mentre in Figura 6.1(b) una foto ripresa sul luogo.

La zona è stata scelta in base all'ampiezza propria e della potenziale superficie convogliata, oltre che per la disponibilità di informazioni precise sulla rete fognaria bianca.

6.1 Analisi delle caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche

In primo luogo sono state valutate le caratteristiche principali dell'area verde esaminata: in questo frangente è stata indispensabile la planimetria fornita dall'Edilog. Grazie al software *AutoCAD*, è stata misurata l'ampiezza dell'area verde (A_{verde}), pari a $768.36 m^2$. Per quanto riguarda le altre caratteristiche, non erano disponibili dati rilevati in sito. Si è effettuato lo stesso ragionamento applicato all'area verde A (vedasi paragrafo 5.1), ipotizzando un terreno da giardino di tipo sabbioso. Sono quindi stati assegnati ai parametri dell'area verde i medesimi valori utilizzati per la zona verde A, sinteticamente richiamati in Tabella 6.1.

In secondo luogo sono stati determinati l'ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) e il tempo di



(a) Foto aerea: zona verde delimitata da una linea rossa (fonte: Google Earth)



(b) Foto ripresa sul luogo

Figura 6.1: Foto dell'area verde B

Tabella 6.1: *Caratteristiche di un terreno da giardino sabbioso*

Parametro	Simbolo	Valore
Porosità	ϕ	0.4
Saturazione iniziale	s_0	0.2 - 0.4
Spessore	S	a partire da 0.2 m
Parametri di Horton	f_0	584.5 mm/h
	f_c	45.7 mm/h
	k	32.71 h ⁻¹

corrivazione (t_c) relativi all'area verde, facendo riferimento alla planimetria a disposizione. Innanzitutto è stata valutata l'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la zona verde, analizzando la pendenza del terreno e la posizione dei pluviali degli edifici vicini: è stato necessario effettuare dei sopralluoghi per compensare l'eventuale mancanza di dati. Sulla base delle informazioni acquisite, si è ipotizzato in primo luogo di dirigere i pluviali del SiTI verso la zona verde. Per quanto riguarda invece i cordoli, si è potuto constatare che il loro livello ricade a filo della superficie verde. Si è quindi ipotizzato di alzarli rispetto al loro attuale livello, andando ad effettuarvi dei tagli per permettere all'acqua di pioggia che cade sul tratto asfaltato tra la Mensa Universitaria Castelfidardo e l'area verde di giungere all'interno di quest'ultima. Si è infine potuta constatare la presenza di un marciapiede che contorna la zona verde dal lato opposto rispetto a quello del SiTI, in pendenza verso l'area stessa e a filo rispetto ad essa. In Figura 6.2(a) vengono riportati l'area convogliata e il percorso di più lungo con cui l'acqua di pioggia arriva all'area verde, corrispondente al tratto che unisce il tetto del SiTI e la zona verde. La posizione del pluviale facente parte del percorso di corrivazione (vedasi Figura 6.2(b)) non corrisponde a quanto indicato sulla planimetria ma è stata accertata tramite sopralluogo. Grazie al software *AutoCAD* è stato possibile misurare sulla planimetria i seguenti dati:

- ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) = 1661.34 m²
- lunghezza del percorso di corrivazione (L_{pr}) = 16.26 m (corrispondente al tratto di colle-



(a) Planimetria generale dell'area convogliata

(b) Particolare del percorso di corrivazione

Figura 6.2: *Planimetria dell'area analizzata. Si riportano in azzurro l'area convogliata, in verde la superficie verde, in tratteggiato grigio gli edifici, con cerchi o quadrati grigi le caditoie, con cerchi o quadrati blu i tombini, in linea verde la rete fognaria bianca e in linea rossa il percorso di corrivazione*

gamento tra il tetto del SiTI e l'area verde, indicato in Figura 6.2(b))

Dopo aver determinato la lunghezza del percorso di corrivazione, ci si è focalizzati sulla valutazione del tempo di corrivazione (vedasi equazione (4.3)). Per quanto riguarda gli altri parametri necessari al calcolo, sono state avanzate le stesse ipotesi applicate all'area verde A:

- tempo di ingresso in rete (t_{ir}) = 1.5 min
- velocità di percorso della rete (v_{pr}) = 0.75 m/s

Basandosi sui dati forniti, è stato ottenuto un tempo di corrivazione (t_c) pari a $3.10 \cdot 10^{-2}$ h (circa 2 min).

6.2 Analisi dell'andamento delle precipitazioni

Per quanto riguarda l'andamento delle precipitazioni sull'area considerata, si è fatto riferimento al servizio "Atlante delle piogge intense" elaborato da Arpa Piemonte [11], che consente di ricavare in qualsiasi punto del territorio piemontese le curve di probabilità pluviometrica, per un assegnato periodo di ritorno e per durate da 10 min a 24 h.

Focalizzandosi sul comune di Torino, si è potuto constatare che i dati di altezza di pioggia (h_p) individuati in funzione della durata sono gli stessi che sono stati utilizzati per l'area verde A, poiché le due aree verdi si collocano all'interno della medesima zona. Sono quindi state applicate le curve di probabilità pluviometrica ricostruite al paragrafo 5.2.

6.3 Analisi del processo di infiltrazione

Partendo dai dati presentati ai paragrafi precedenti, è stato implementato sulla zona verde il programma elaborato mediante il software *MATLAB*. Si è scelto di analizzare l'area verde su un arco temporale da 0 a 2 h, discretizzato in passi di ampiezza 0.001 h, fissando il tempo di ritorno (T) a 2 anni.

In primo luogo è stato esaminato l'andamento dell'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la superficie verde (vedasi Figura 6.3(a)): partendo dal valore nullo, essa aumenta seguendo un percorso rettilineo fino ad arrivare ad un massimo di 1661.34 m^2 , in corrispondenza del tempo di corrivazione. Da questo istante in poi si mantiene costante all'aumentare del tempo di precipitazione. In Figura 6.3(b) viene riportato un focus sulla porzione di grafico più rilevante,

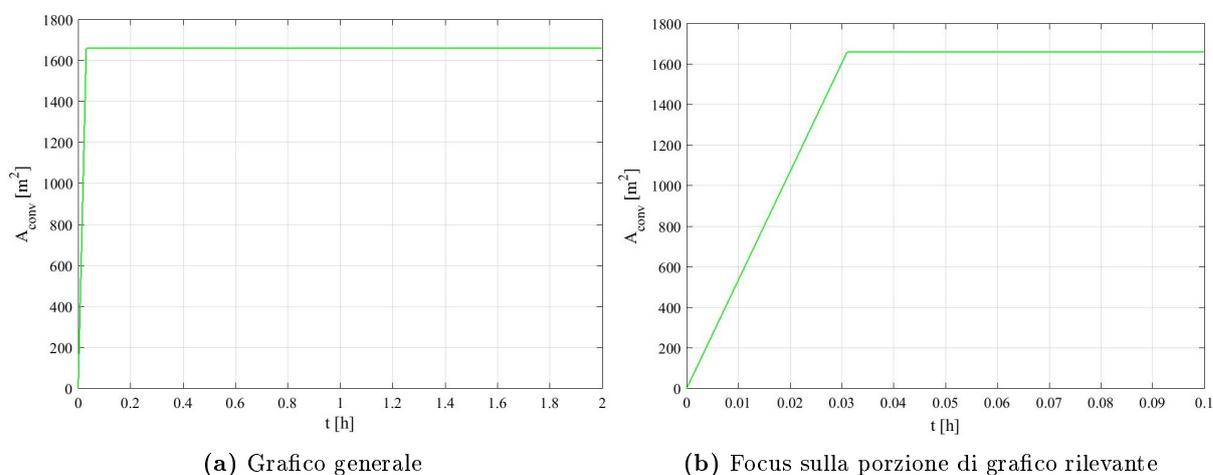


Figura 6.3: Andamento dell'ampiezza dell'area convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

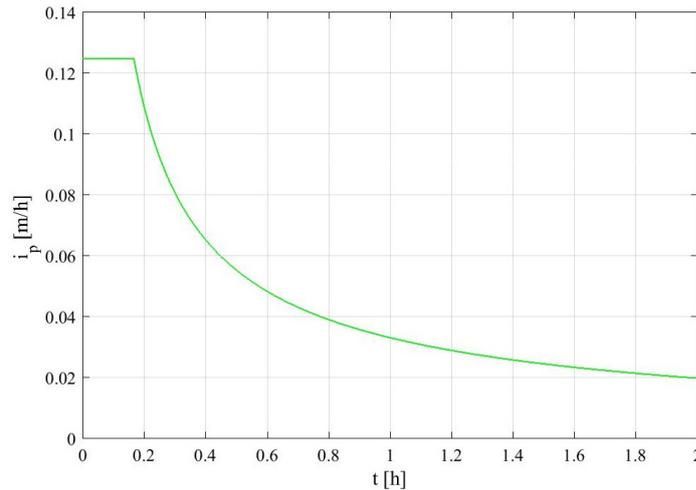


Figura 6.4: Andamento dell'intensità di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

relativa al tratto di crescita del parametro.

Si è poi passati a valutare l'intensità di pioggia sulla base dell'andamento delle precipitazioni caratteristico dell'area considerata (vedasi equazione (4.6)). In questo frangente è però emerso un problema legato al fatto che le curve di probabilità pluviometrica coprono un arco temporale da 10 *min* a 24 *h* mentre l'area verde viene studiata a partire dall'istante 0. A causa della mancanza di dati relativi alle altezze di pioggia da 0 a 10 *min*, si è ipotizzato di mantenere l'intensità di pioggia costante su questo arco temporale, eguagliandola al valore che essa stessa assume in corrispondenza di un tempo pari a 10 *min*. In Figura 6.4 viene riportato il risultato ottenuto: il parametro parte da un valore pari a $1.25 \cdot 10^{-1}$ *m/h*, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Sulla base dei risultati ottenuti e dei dati a disposizione è stato quindi possibile analizzare la portata in ingresso, pari alla somma tra la portata di pioggia e la portata convogliata (vedasi equazione (4.5)).

Il primo dei due contributi, calcolato mediante l'equazione (4.7), presenta l'andamento riportato in Figura 6.5: partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino ad un massimo di 95.92 m^3/h , si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

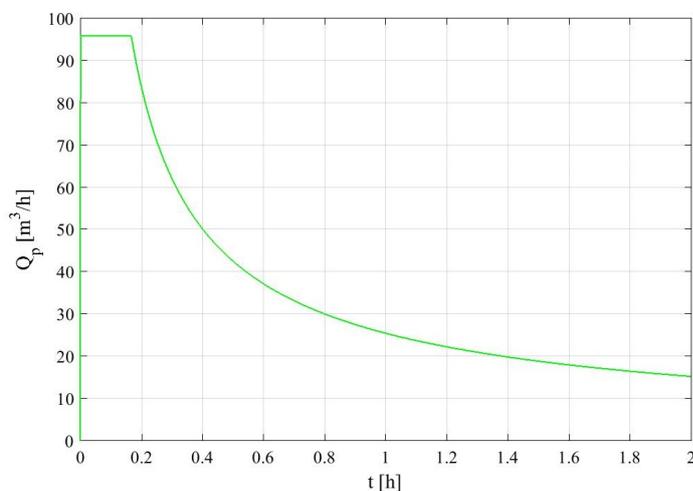


Figura 6.5: Andamento della portata di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

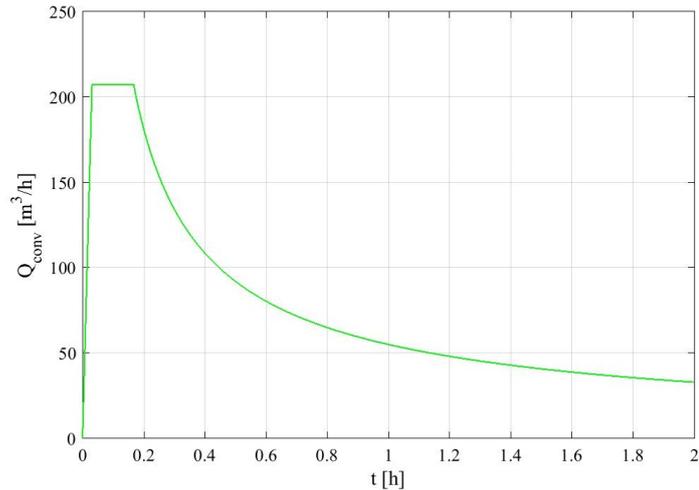


Figura 6.6: Andamento della portata convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

Per quanto riguarda il secondo contributo alla portata in ingresso, calcolato mediante l'equazione (4.8), si rimanda al grafico riportato in Figura 6.6: partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $207.40 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Si è quindi potuto analizzare l'andamento della portata in ingresso (vedasi Figura 6.7): partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $303.20 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Valutata la portata in ingresso, si è passati a valutare l'intensità di arrivo sulla base dell'equazione (4.9): l'andamento ottenuto è riportato in Figura 6.8. Partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $3.95 \cdot 10^{-1} \text{ m}/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo, è stato necessario esaminare l'andamento della capacità d'infiltrazione, per poterle confrontare e definire il comportamento dell'area verde nel ricevere la portata in ingresso. Sulla base delle considerazioni emerse dallo studio della zona verde A, si è scelto di far riferimento alla legge di Horton, che si è dimostrata il modello più preciso fra quelli presi in esame. La capacità d'infiltrazione è stata quindi eguagliata al tasso di infiltrazione

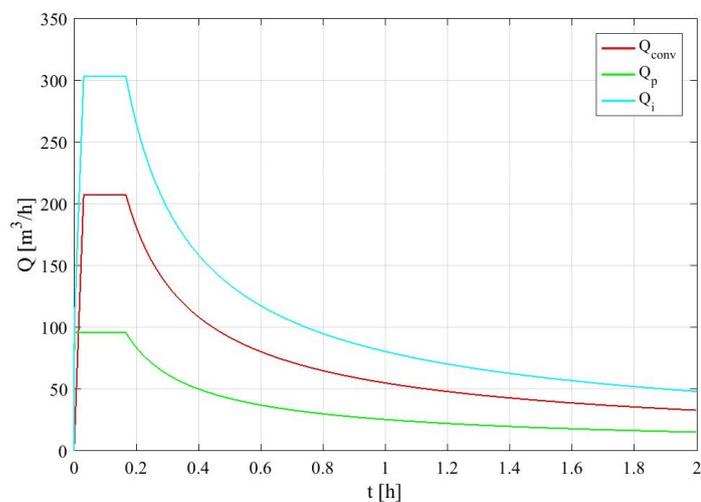


Figura 6.7: Andamento della portata in ingresso Q_i in funzione del tempo, confrontata con la portata convogliata Q_{conv} e la portata di pioggia Q_p (periodo di ritorno = 2 anni)

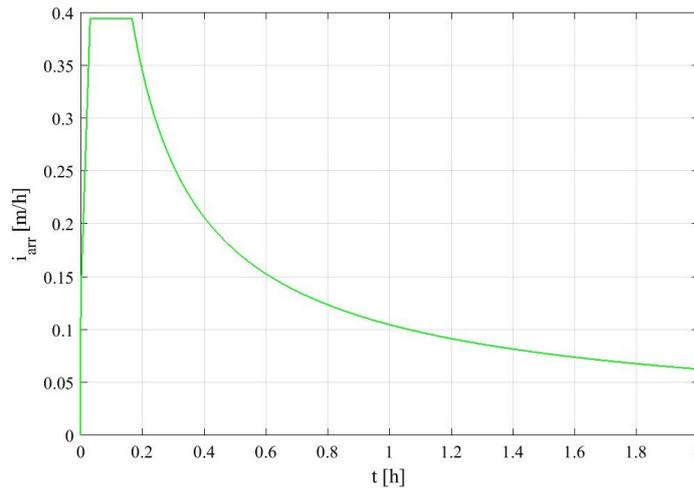


Figura 6.8: Andamento dell'intensità di arrivo in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

potenziale (f_p), il cui andamento è già stato analizzato nell'ambito dello studio sulla prima area verde. Infatti la tipologia di terreno esaminata è la stessa e, di conseguenza, anche i parametri del modello di Horton restano invariati: si rimanda quindi al paragrafo 5.3.2.

Nell'ambito della presente analisi, è stato necessario affrontare il seguente problema, allo scopo di attribuire un valore al grado di saturazione iniziale (s_0). Il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale (f_0), riportato al paragrafo 6.1, corrisponde ad un grado di saturazione pari a 0. Il grado di saturazione iniziale per un terreno da giardino sabbioso si inserisce però in un range che va da 0.2 a 0.4. Allo scopo di quantificare il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale, è necessario conoscere la relazione tra il parametro stesso e il grado di saturazione per un terreno di tipo sabbioso: è stato quindi ricercato del materiale, senza però reperire documenti pertinenti. Di conseguenza, si è scelto di procedere ipotizzando un grado di saturazione iniziale pari a 0, di cui è noto il corrispondente tasso di infiltrazione potenziale. Sono stati infine ipotizzati uno spessore (S) della zona verde pari a 0.2 m e un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) pari a 3 cm.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo e la capacità d'infiltrazione, è stato possibile determinare l'andamento della portata in uscita: in Figura 6.9 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). Dall'istante iniziale a 1 min circa, la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Superato il periodo iniziale di 1 min, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che aumenta progressivamente nel tempo. Nel momento in cui l'acqua accumulata supera il bordo dello stramazzo, la portata in uscita inizia a crescere. Il parametro raggiunge quindi un massimo di 266.42 m³/h e poi decresce in funzione del tempo di precipitazione. Il repentino aumento che si verifica a 1 h e 30 min circa rappresenta il momento in cui l'area verde raggiunge la saturazione: ne consegue che la portata in ingresso va ad alimentare totalmente quella in uscita. Superato questo istantaneo aumento, la portata in uscita torna a decrescere in funzione del tempo, seguendo l'andamento della portata in ingresso.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.41 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

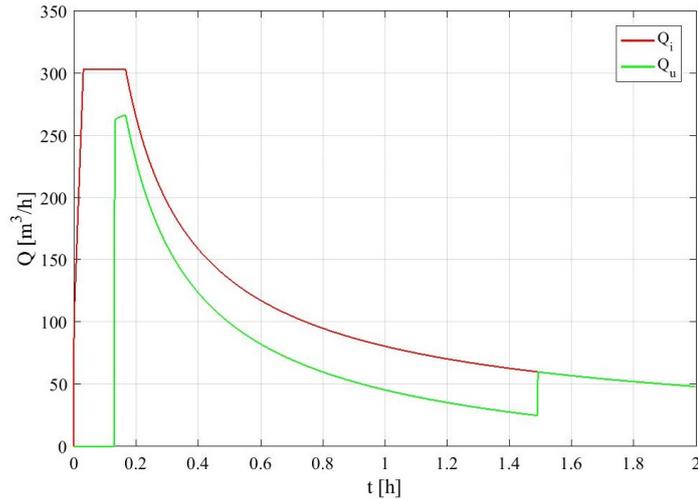


Figura 6.9: Confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

Tabella 6.2: Parametri di prestazione dell'area verde (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	84.52	1.49

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}): i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.2. I risultati raggiunti sono stati moderatamente positivi, mettendo in evidenza il ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata in ingresso. Considerando l'entità della portata stessa, la zona verde riesce a bloccarne solo una modesta quota, come evidenziato dal valore assunto dal volume trattenuto. Inoltre il ruolo svolto dall'area verde va a coprire un intervallo di circa 1 h e 30 min, che rappresenta il tempo di raggiungimento della saturazione. Si è però ancora lontani dall'obiettivo prefissato, corrispondente alla situazione in cui la zona verde va ad incidere in modo significativo sulla portata in ingresso. Infatti il tempo che la portata in uscita impiega ad instaurarsi è molto basso, pari circa a 8 min. Inoltre l'area verde presenta una bassa efficacia nel ridurre il picco della portata in ingresso, come evidenziato dal valore assunto dal tasso di abbattimento.

Si è quindi deciso di esaminare la zona verde facendo variare i dati di input: in primo luogo si è agito sul tempo di ritorno, esaminando l'influenza di questo cambiamento sulla portata in uscita e, di conseguenza, sui parametri di prestazione dell'area verde. In secondo luogo si è scelto di far variare lo spessore, il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo e la tipologia terreno e si è ipotizzato l'inserimento di materiale alveolare, con l'obiettivo di individuare la configurazione migliore per ridurre la portata in ingresso.

6.3.1 Confronto al variare del tempo di ritorno

Il primo confronto è stato effettuato facendo variare il tempo di ritorno (T): sono stati considerati i valori 2 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 10 anni e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sugli andamenti della portata in ingresso e della portata in uscita.

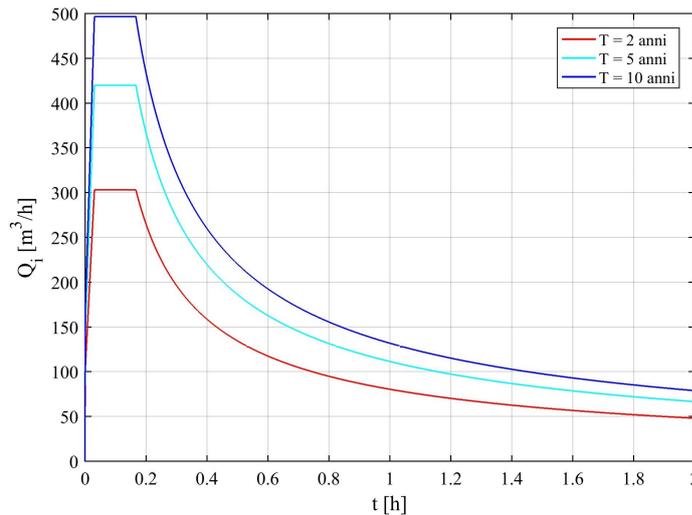


Figura 6.10: Andamento della curva della portata in ingresso Q_i al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone = 3 cm)

Il primo parametro esaminato è la portata in ingresso (vedasi Figura 6.10): la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 *anni*, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 *anni* e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 *anni*. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in ingresso assume valori progressivamente maggiori. Questo comportamento è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento dell'altezza di pioggia, dell'intensità di pioggia ed infine dei due contributi alla portata in ingresso.

Il secondo parametro esaminato è la portata in uscita (vedasi Figura 6.11): la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 *anni*, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 *anni* e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 *anni*. Confrontando le tre curve di può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in uscita si instaura progressivamente in

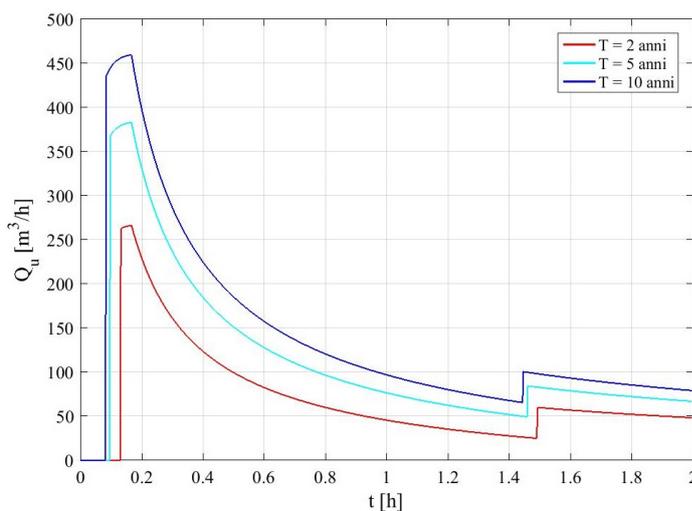


Figura 6.11: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone = 3 cm). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a $8.25 \cdot 10^{-2}$ h, istante in cui la curva blu si discosta dal valore nullo; la curva rossa e quella azzurra continuano a coincidere fino a $9.65 \cdot 10^{-2}$ h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

Tabella 6.3: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	84.52	1.49
5	$9.65 \cdot 10^{-2}$	0.91	84.52	1.46
10	$8.25 \cdot 10^{-2}$	0.93	84.52	1.44

anticipo ed assume valori maggiori. Questi due fattori determinano anche un anticipo dell'istante di raggiungimento della condizione di saturazione dell'area verde, rappresentata dal repentino aumento che si verifica durante la fase di decrescita del parametro. Il comportamento appena descritto è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento della portata in ingresso e, di conseguenza, della portata in uscita, che dipende da essa.

I risultati ottenuti per tempi di ritorno di 5 e 10 *anni* sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $3.34 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ e $3.95 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del tempo di ritorno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.3. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. L'unico parametro che rimane invariato è il volume trattenuto dall'area verde, su cui il tempo di ritorno non va ad incidere.

6.3.2 Confronto al variare dello spessore

Il secondo confronto è stato effettuato facendo variare lo spessore dell'area verde (S) ed esaminando il modo in cui questo cambiamento influisce sulla portata in uscita. Sono stati considerati valori di spessore pari a 0.2 (corrispondente al caso iniziale) e 0.5 m. È stato inoltre analizzato il caso in cui l'area verde non presenti un limite inferiore e non possa giungere alla saturazione: il drenaggio dell'acqua di pioggia continua perciò durante l'intero evento di precipitazione.

Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 5 h. Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 6.12: la curva rossa corrisponde ad uno spessore di 0.2 m, la curva azzurra ad uno spessore di 0.5 m e la curva blu ad uno spessore illimitato.

Mettendo a confronto in primo luogo la curva azzurra con quella rossa è emerso che, all'aumentare dello spessore dell'area verde, si verifica un ritardo dell'istante in cui l'area verde raggiunge la condizione di saturazione, rappresentato dal repentino aumento della portata in uscita durante la fase di decrescita. In questo frangente però risulta opportuno effettuare due considerazioni.

Innanzitutto è necessario sottolineare che per la curva azzurra, l'area verde raggiunge la saturazione a circa 4 h e 16 min, in ritardo rispetto a quanto si verifica per la curva rossa. Questo comportamento è dovuto al fatto che, aumentando lo spessore della zona verde, aumenta anche il massimo volume stoccabile dalla stessa e quindi il tempo necessario a saturarla.

Inoltre è emerso che all'incirca a 3 h, la portata in uscita per la curva azzurra va ad annullarsi:

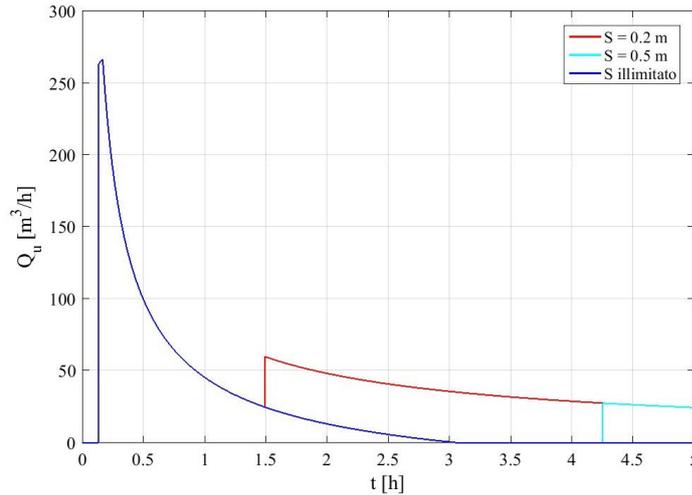


Figura 6.12: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare dello spessore S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a 1.49 h, istante in cui la curva rossa presenta un repentino aumento; la curva blu e quella azzurra continuano a coincidere fino a 4.26 h, istante in cui la curva azzurra presenta un repentino aumento

questo comportamento è dovuto al fatto che, all'istante considerato, la capacità d'infiltrazione torna ad essere superiore all'intensità di arrivo. Ne consegue che tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde e la portata in uscita va quindi ad assumere il valore nullo. In questa fase la capacità d'infiltrazione è tale da permettere all'area verde di assorbire non solo il volume in ingresso ma anche una quota di quello accumulato. Nell'istante in cui la zona verde raggiunge la saturazione, la portata in ingresso va ad alimentare totalmente lo strato d'acqua accumulato sulla superficie. Dal momento che la porzione di volume accumulato che si è infiltrata è ridotta, la lama d'acqua supera subito il bordo dello stramazzo e la portata in uscita subisce un repentino aumento.

Mettendo poi a confronto la curva blu con quella rossa, sono emerse le stesse considerazioni presentate nell'analisi precedente. L'unica differenza rilevata è legata al fatto che, per la curva blu, l'area verde non raggiunge la condizione di saturazione: ne consegue che tutto il volume accumulato viene assorbito e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

I risultati ottenuti per uno spessore di 0.5 m e per uno illimitato sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $1.23 \cdot 10^{-2} m^3$ e $1.76 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso nei tre casi analizzati, è stato possibile valutare l'influenza dello spessore sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.4. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto sia del tempo di raggiungimento della saturazione, mentre il tempo in cui si instaura la portata in uscita e il tasso di abbattimento rimangono invariati.

Dal confronto fra i tre casi analizzati, le configurazioni migliori risultano essere quelle in cui lo spessore dell'area verde è rispettivamente pari a 0.5 m e illimitato. In particolare il secondo schema appare il più efficace, poiché non vi è la presenza di uno strato inferiore che limiti il

Tabella 6.4: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	84.52	1.49
0.5	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	176.72	4.26
illim	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	illim	n.d.

Tabella 6.5: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T e dello spessore S (grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

T [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim
2	$1.31 \cdot 10^{-1}$			0.88	176.72	illim	4.26	n.d.
5	$9.65 \cdot 10^{-2}$			0.91	176.72	illim	4.09	n.d.
10	$8.25 \cdot 10^{-2}$			0.93	176.72	illim	4.07	n.d.

volume stoccabile dal mezzo e il processo di infiltrazione continua per tutta la durata della precipitazione.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare le due configurazioni proposte facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 *anni*. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.5. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 6.3.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita e un aumento del tasso di abbattimento. Inoltre nel caso di uno spessore pari a 0.5 m, si verifica anche una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, le due soluzioni proposte risultano comunque valide, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato. In particolare la configurazione che presenta uno spessore illimitato viene confermata come la migliore, poichè l'area verde non presenta limiti di volume trattenuto e non raggiunge la condizione di saturazione, anche in caso di aumento del tempo di ritorno. In questo frangente risulta necessario sottolineare che potrebbe non essere consentita la presenza di uno spessore illimitato, ad esempio nel caso in cui l'area sia soggetta a problemi di inquinamento e risulti opportuno inserire uno strato che la limiti inferiormente.

6.3.3 Confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo

Il terzo confronto è stato effettuato facendo variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p): sono stati considerati i valori 3 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 7.5 cm e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. Per quanto concerne i valori di dislivello pari a 5 e 7.5 cm, si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata al di sotto della superficie verde che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato (vedasi paragrafo 6.4). In questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde. Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 5 h. Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 6.13: la curva rossa corri-

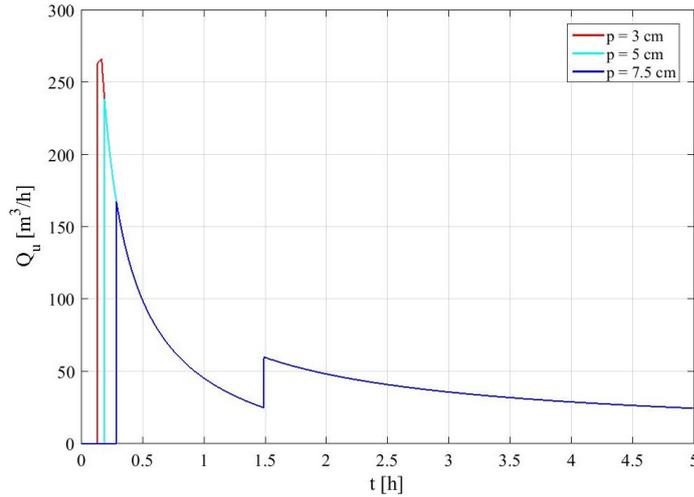


Figura 6.13: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a $1.31 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva rossa si discosta dal valore nullo; la curva azzurra e quella blu continuano a coincidere fino a $1.90 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo e torna a coincidere con la curva rossa. A $2.86 \cdot 10^{-1}$ h la curva blu si discosta dal valore nullo e torna a coincidere con le altre due curve

sponde ad un dislivello di 3 cm, la curva azzurra ad un dislivello di 5 cm e la curva blu ad un dislivello di 7.5 cm. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, aumenta il tempo necessario affinché si instauri la portata in uscita, poiché aumenta il tempo che occorre alla lama d'acqua accumulata per superare il bordo dello stramazzo. Ne consegue quindi un abbassamento del picco della portata in uscita.

I risultati ottenuti per dislivelli di 5 e 7.5 cm sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, in entrambi i casi è stato rilevato un errore di $1.23 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del dislivello sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.6. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del volume trattenuto e del tempo in cui si instaura la portata in uscita. Contemporaneamente si verifica anche una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione resta invariato.

Dal confronto fra i tre casi analizzati, le configurazioni migliori risultano essere quelle in cui il

Tabella 6.6: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

p [cm]	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
3	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	84.52	1.49
5	$1.90 \cdot 10^{-1}$	0.78	99.89	1.49
7.5	$2.86 \cdot 10^{-1}$	0.55	119.10	1.49

Tabella 6.7: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S e del dislivello p (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$p=5$ cm	$=7.5$ cm	$p=5$ cm	$=7.5$ cm	$p=5$ cm	$=7.5$ cm	$p=5$ cm	$=7.5$ cm
0.2	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$2.86 \cdot 10^{-1}$	0.78	0.55	99.89	119.10		1.49
0.5	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$2.86 \cdot 10^{-1}$	0.78	0.55	192.09	211.30		4.12
illim	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$2.86 \cdot 10^{-1}$	0.78	0.55	illim			n.d.

dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo è pari rispettivamente a 5 e 7.5 cm. In particolare il secondo schema appare il più efficace, poiché riduce in modo significativo il picco della portata in ingresso.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare le due configurazioni facendo variare lo spessore dell'area verde (S) a partire da 0.2 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.7. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 6.3.2). Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde sia del tempo di raggiungimento della saturazione. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è illimitato e il dislivello è pari a 7.5 cm. Per lo stesso problema già presentato al paragrafo 6.3.2, potrebbe però non essere consentita la presenza di uno spessore illimitato. Dal confronto effettuato sui risultati ottenuti, appare evidente che anche con uno spessore di 0.5 m la configurazione risulta valida.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare le configurazioni proposte facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.8. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 6.3.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita e un aumento del tasso di abbattimento. Inoltre nel caso di uno spessore pari a 0.5 m, si verifica anche una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, le due soluzioni proposte risultano comunque valide, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato. In particolare la configurazione che presenta uno spessore illimitato viene confermata come la migliore, poiché l'area verde non presenta limiti di volume trattenuto e non raggiunge la condizione di saturazione, anche in caso di aumento del tempo di ritorno.

Tabella 6.8: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T e dello spessore S (grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 7.5 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

T [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$S=0.5$ cm	S illim	$S=0.5$ cm	S illim	$S=0.5$ cm	S illim	$S=0.5$ cm	S illim
2	$2.86 \cdot 10^{-1}$			0.55	211.30	illim	4.12	n.d.
5	$1.89 \cdot 10^{-1}$			0.83	211.30	illim	4.09	n.d.
10	$1.60 \cdot 10^{-1}$			0.93	211.30	illim	4.07	n.d.

6.3.4 Confronto al variare della tipologia di terreno

Il quarto confronto è stato effettuato facendo variare la tipologia di terreno: si è quindi ipotizzato di sostituire la sabbia con la ghiaia (vedasi paragrafo 3.3.2), analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita.

Sulla base dello studio effettuato sull'area verde A (vedasi paragrafo 5.3.2.5), si è deciso di assegnare alla porosità il valore 0.45 [3] ed eguagliare la capacità d'infiltrazione alla conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}), fissandone il valore a 10^{-4} m/s [7].

È stato effettuato un confronto fra il caso in cui è presente terreno sabbioso e quello in cui è presente terreno ghiaioso ed il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 6.14: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno ghiaioso. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla tipologia di terreno. In questo frangente è necessario esaminare il comportamento di un terreno ghiaioso, dal momento che quello di un terreno sabbioso è stato analizzato in precedenza.

Considerando quindi la curva azzurra, per i primi 2 min circa la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo. Superato questo periodo iniziale, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte va ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che cresce progressivamente nel tempo.

Dopo 11 min dall'inizio dell'analisi, la capacità d'infiltrazione torna ad essere superiore all'intensità d'arrivo: il volume precedentemente accumulato viene quindi assorbito e contemporaneamente tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, che raggiunge la condizione di saturazione. Da questo momento in poi, il volume in ingresso inizia ad accumularsi sulla superficie verde, fino a raggiungere il bordo dello stramazzo e a determinare l'instaurarsi di una portata in uscita.

Ad eccezione del primo minuto di analisi, la capacità d'infiltrazione relativa alla curva azzurra risulta sempre superiore a quella relativa alla curva rossa: ne consegue che per la curva azzurra

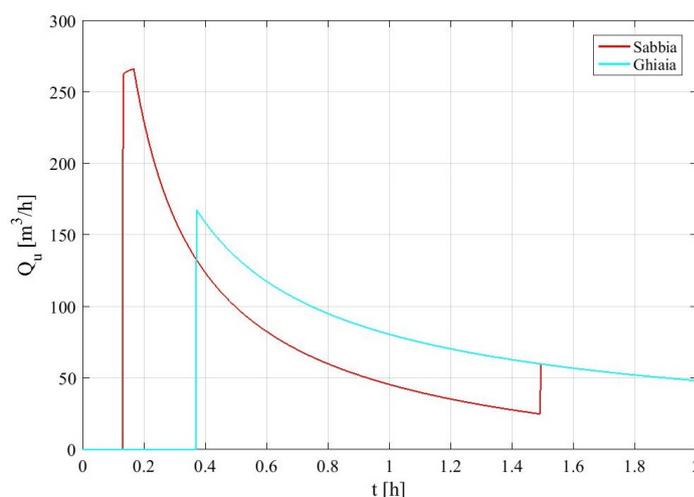


Figura 6.14: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare della tipologia di terreno (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Si può notare che le due curve coincidono fino a $1.90 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva rossa si discosta dal valore nullo. Le due curve tornano a coincidere a 1.49 h, istante in cui la curva rossa subisce un repentino aumento

Tabella 6.9: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare della tipologia di terreno (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

Materiale	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
Sabbia	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	84.52	1.49
Ghiaia	$3.71 \cdot 10^{-1}$	0.55	92.20	$2.59 \cdot 10^{-1}$

l'area verde raggiunge la condizione di saturazione in anticipo rispetto a quanto avviene per la curva rossa.

Dall'altra parte però, in base alle dinamiche precedentemente descritte, la portata in uscita si instaura prima per la curva rossa e poi per la curva azzurra: di conseguenza, il picco raggiunto dalla curva azzurra risulta minore rispetto a quello raggiunto dalla curva rossa.

Il risultato ottenuto sostituendo il terreno sabbioso con un terreno ghiaioso è stato validato dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.41 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della tipologia di terreno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.9. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che la sostituzione del terreno sabbioso con uno ghiaioso determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde. Contemporaneamente si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione diminuisce.

Dal confronto fra i due casi analizzati, la configurazione migliore risulta quella in cui è presente terreno ghiaioso.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare lo spessore dell'area verde da 0.2 m a 0.5 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.10. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 6.3.2). Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde, sia del tempo di raggiungimento della saturazione e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m. Allo scopo di migliorarla ulteriormente, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo da 3 a 7.5 cm. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.11. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del dislivello tra

Tabella 6.10: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (terreno ghiaioso, tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm)

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$3.71 \cdot 10^{-1}$	0.55	92.20	$2.59 \cdot 10^{-1}$
0.5	1.48	0.20	195.93	1.13

Tabella 6.11: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (terreno ghiaioso, periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m)

p [cm]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
3	1.48	0.20	195.93	1.13
5	1.75	0.18	211.30	1.13
7.5	2.14	0.15	230.51	1.13

Tabella 6.12: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (terreno ghiaioso, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 7.5 cm)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	2.14	0.15	230.51	1.13
5	1.05	0.26	230.51	$6.30 \cdot 10^{-1}$
10	$7.53 \cdot 10^{-1}$	0.33	230.51	$6.28 \cdot 10^{-1}$

terreno e bordo dello stramazzo determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde e, contemporaneamente, si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione si mantiene costante. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m e il dislivello fra terreno e bordo dello stramazzo è pari a 7.5 cm.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.12. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 6.3.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

6.3.5 Confronto in presenza di materiale alveolare

Il quinto confronto è stato effettuato ipotizzando di inserire uno strato di materiale alveolare (avente una porosità pari a 0.9 [7]) al di sotto di uno strato di terreno sabbioso (vedasi paragrafo 3.3.3) ed analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. In questo frangente è ancora il terreno sabbioso a determinare il processo di infiltrazione: la presenza del materiale alveolare influenza solo il valore del massimo volume stoccabile, causandone un aumento.

È stato effettuato un confronto fra il caso in cui vi siano 0.2 m di terreno sabbioso rispetto a quello in cui vi siano 0.15 m di terreno sabbioso (valore minimo affinché possa essere mantenuto un tappeto erboso) sovrastanti 0.05 m di materiale alveolare. Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 4 h.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 6.15: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno sabbioso sovrastante del materiale alveolare. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento

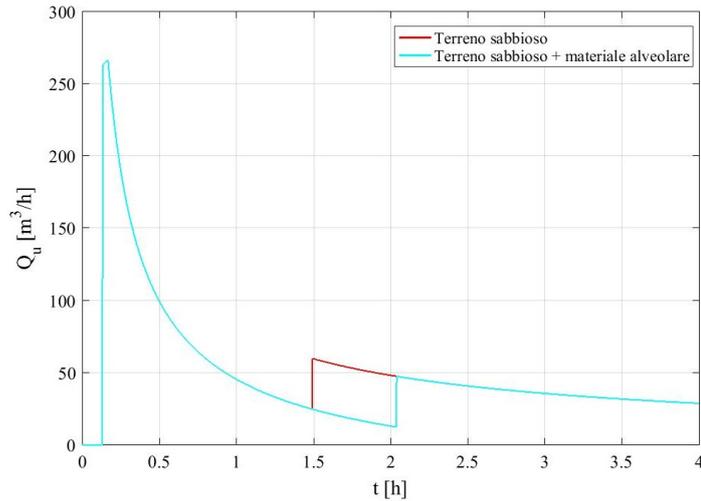


Figura 6.15: Andamento della curva della portata in uscita in presenza di materiale alveolare (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m. Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a 1.49 h, istante in cui la curva rossa presenta un repentino aumento; nell'istante in cui anche la curva azzurra presenta un repentino aumento, le due curve tornano a coincidere

della portata in uscita è influenzato dalla presenza del materiale alveolare, che determina un aumento del massimo volume stoccabile: ne consegue un ritardo dell'istante in cui l'area verde giunge alla condizione di saturazione.

I risultati ottenuti in presenza del materiale alveolare sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $1.45 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della presenza del materiale sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.13. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aggiunta di materiale alveolare determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde sia del tempo di raggiungimento della saturazione. Il tempo in cui si instaura la portata in uscita e il tasso di abbattimento rimangono invece invariati.

Dal confronto fra i due casi analizzati, la configurazione migliore risulta quella in cui è presente uno strato di materiale alveolare.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare

Tabella 6.13: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto in presenza di materiale alveolare (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m

Materiale alveolare	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
No	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	84.52	1.49
Sì	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	103.73	2.04

Tabella 6.14: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (presenza di materiale alveolare, periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso resta fisso a 0.15 m, mentre viene fatto variare lo spessore del materiale alveolare da 0.05 m a 0.35 m

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	103.73	2.04
0.5	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	311.19	9.94

lo spessore dell'area verde, da 0.2 m a 0.5 m. Si è mantenuto pari a 0.15 m lo spessore dello strato di sabbia, mentre si è fatto variare lo spessore del sottostante strato di materiale alveolare da 0.05 a 0.35 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.14. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 6.3.2). Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde sia del tempo di raggiungimento della saturazione. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m.

Allo scopo di migliorarla ulteriormente, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo da 3 a 7.5 cm. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.15. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi 6.3.3). Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde. Contemporaneamente si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento mentre il tempo di raggiungimento della saturazione si mantiene costante. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui è presente materiale alveolare di spessore pari a 0.35 m e il dislivello fra terreno e bordo dello stramazzo viene aumentato a 7.5 cm.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 6.16. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 6.3.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

Tabella 6.15: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo p (presenza di materiale alveolare, periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre lo spessore del materiale alveolare è pari 0.35 m

p [cm]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
3	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	311.19	9.94
5	$1.91 \cdot 10^{-1}$	0.79	326.55	8.93
7.5	$2.87 \cdot 10^{-1}$	0.55	345.76	7.95

Tabella 6.16: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (presenza di materiale alveolare, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 7.5 cm). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre lo spessore del materiale alveolare è pari 0.35 m

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	$2.87 \cdot 10^{-1}$	0.55	345.76	7.95
5	$1.89 \cdot 10^{-1}$	0.83	345.76	7.92
10	$1.60 \cdot 10^{-1}$	0.93	345.76	7.90

6.4 Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 6.3.3, è stata analizzata la possibilità di innalzare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo a 5 e a 7.5 cm. In questo frangente, si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato: in questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde. Sono state quindi ipotizzate due possibili collocazioni dello scarico: all'estremità superiore e all'estremità inferiore dell'area verde. Per entrambi i casi scelti, è stato individuato il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) e la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), in base alla quale è stata applicata l'equazione (4.27) ed è stato stimato il diametro (ϕ_{luce}).

Bocca di scarico collocata all'estremità superiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità superiore dell'area verde, è necessario far riferimento alla legge di efflusso da una luce a battente (vedasi paragrafo 4.4.1).

Si è quindi ipotizzato che il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) sia pari a 2 h e si è applicata l'equazione (4.31) per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}). Sono stati considerati valori di dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) pari a 5 e 7.5 cm, conseguendo i risultati riportati in Tabella 6.17. Sulla base dei valori ottenuti, è stato quindi possibile quantificare il diametro della bocca di scarico (ϕ_{luce}): ne consegue che la presenza di un dislivello di 5 cm richiede un diametro di 15 cm, mentre la presenza di un dislivello di 7.5 cm richiede un diametro di 17 cm.

Bocca di scarico collocata all'estremità inferiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità inferiore dell'area verde, è necessario tenere in considerazione non soltanto il processo di efflusso attraverso di essa ma anche il processo di infiltrazione all'interno del terreno (vedasi paragrafo 4.4.2).

Risulta quindi indispensabile far riferimento sia alla legge di efflusso da una luce a battente, sia alla legge di Darcy. Si è calcolato in primo luogo il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}), utilizzando la legge di Darcy (vedasi equazione 4.35) ed eguagliando la conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}) al parametro f_c del modello Horton. Il valore ottenuto è stato quindi a sua volta adoperato per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), utilizzando la legge di efflusso da una luce a battente. Sono stati considerati valori di

Tabella 6.17: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità superiore dell'area verde. Si è fatto variare il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p)

Parametro	$p=5$ cm	$p=7.5$ cm
Ω_{luce} [m]	$1.77 \cdot 10^{-2}$	$2.16 \cdot 10^{-2}$
ϕ_{luce} [cm]	15	16.60

Tabella 6.18: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità inferiore dell'area verde. Si è fatto variare sia il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p), sia lo spessore dell'area verde (S)

Parametro	$p=5\text{ cm}$		$p=7.5\text{ cm}$	
	$S=0.2\text{ m}$	$S=0.5\text{ m}$	$S=0.2\text{ m}$	$S=0.5\text{ m}$
$t_{svuot}\text{ [h]}$	0.98	1.04	1.39	1.53
$\Omega_{luce}\text{ [m]}$	$3.62 \cdot 10^{-2}$	$3.39 \cdot 10^{-2}$	$2.53 \cdot 10^{-2}$	$2.31 \cdot 10^{-2}$
$\phi_{luce}\text{ [cm]}$	21.46	20.77	17.96	17.15

dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) pari a 5 e 7.5 cm e valori di spessore dell'area verde (S) pari a 0.2 e 0.5 m, conseguendo i risultati riportati in Tabella 6.18. Sulla base dei valori ottenuti, è stato quindi possibile quantificare il diametro della bocca di scarico (ϕ_{luce}). Ne consegue che la presenza di un dislivello pari a 5 cm richiede un diametro di 21 cm sia per uno spessore di 0.2 m, sia per uno spessore di 0.5 m. Invece la presenza di un dislivello pari a 7.5 cm richiede un diametro di 18 cm per uno spessore di 0.2 m e un diametro di 17 cm per uno spessore di 0.5 m.

6.5 Conclusioni

Dopo aver analizzato in modo approfondito l'area verde B, è stato possibile individuare le configurazioni migliori allo scopo di ridurre in modo significativo la portata in ingresso. In particolare sono state effettuate delle prove facendo variare una parte dei dati di input del programma, con l'obiettivo di esaminarne gli effetti sull'andamento della portata in uscita e, di conseguenza, sulle prestazioni della zona verde esaminata.

Si è potuto constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento della prestazione offerta dall'area verde. Si verifica infatti un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione.

Si è inoltre potuto constatare che l'aumento dello spessore e del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo determinano un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. In entrambi i casi infatti si verifica un aumento del volume trattenuto dall'area verde: nel primo caso si realizza anche un aumento del tempo di raggiungimento della saturazione, mentre nel secondo caso un aumento del tempo in cui si instaura la portata in uscita e una diminuzione del tasso di abbattimento.

Infine si è osservato che anche la variazione della tipologia di terreno e l'inserimento di materiale alveolare determinano un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. Nel caso in cui si sostituisca il terreno sabbioso con uno ghiaioso, si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. Invece nel caso in cui si aggiunga del materiale alveolare, si verifica un aumento del volume trattenuto e del tempo di raggiungimento della saturazione.

Dopo aver effettuato diverse prove al variare dei dati di input, sono state individuate le configurazioni migliori per raggiungere l'obiettivo di ridurre in modo significativo la portata in ingresso. La prima configurazione proposta presenta uno spessore illimitato, che consente all'area verde di assorbire l'acqua di pioggia per tutta la durata dell'evento, senza raggiungere la condizione di saturazione. Questa soluzione però non è sempre realizzabile, per le problematiche espresse al paragrafo 6.3.2: in questo frangente si può considerare ottimale una configurazione che presenti uno spessore pari a 0.5 m.

In Tabella 6.19 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, per uno spessore sia pari a 0.5 m sia illimitato.

Tabella 6.19: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno spessore di 0.5 m oppure, dove possibile, illimitato (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo = 3 cm). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"*

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.5	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	176.72	4.26
illim	$1.31 \cdot 10^{-1}$	0.88	illim	n.d.

Tabella 6.20: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti un dislivello di 7.5 cm e uno spessore di 0.5 m oppure, dove possibile, illimitato (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"*

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.5	$2.86 \cdot 10^{-1}$	0.55	211.30	4.26
illim	$2.86 \cdot 10^{-1}$	0.55	illim	n.d.

La seconda configurazione proposta presenta un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo pari a 7.5 cm, che consente all'area verde di abbattere notevolmente il picco della portata in ingresso. In questo caso si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata al di sotto della superficie verde che, in seguito all'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato.

Combinare questa soluzione con un aumento dello spessore consente poi di ottenere risultati ulteriormente positivi per quanto concerne la prestazione offerta dall'area verde. In questo ambito occorre però tenere nuovamente in considerazione le problematiche che potrebbero emergere nel caso in cui lo spessore sia illimitato, sottolineando che anche in presenza di uno spessore pari a 0.5 m possono essere raggiunti risultati ulteriormente positivi.

In Tabella 6.20 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde per un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm, considerando uno spessore sia pari a 0.5 m sia illimitato.

La terza configurazione proposta prevede di sostituire il terreno sabbioso con un terreno ghiaioso spesso 0.5 m: questa soluzione consente sia di abbattere il picco, sia di trattenere una quota significativa della portata in ingresso.

Combinare questa soluzione con un aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo consente poi di ottenere risultati ulteriormente positivi per quanto concerne la prestazione offerta dall'area verde. In particolare portare il dislivello al valore di 7.5 cm rappresenta la configurazione più valida in questo ambito.

In Tabella 6.21 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, in presenza di terreno ghiaioso spesso 0.5 m e di un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm.

Tabella 6.21: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui sia presente un terreno ghiaioso spesso 0.5 m e un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)*

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2.14	0.15	230.51	1.13

Tabella 6.22: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno strato di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m, e un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)*

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
$2.87 \cdot 10^{-1}$	0.55	345.76	7.95

La quarta configurazione proposta prevede di inserire uno strato di materiale alveolare di spessore pari a 0.35 m al di sotto di uno strato di terreno sabbioso di spessore pari a 0.15 m: questa soluzione consente all'area verde di trattenere una quota significativa della portata in ingresso, raggiungendo la condizione di saturazione dopo un tempo notevolmente lungo.

Combinare questa soluzione con un aumento del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo consente poi di ottenere risultati ulteriormente positivi per quanto concerne la prestazione offerta dall'area verde. In particolare portare il dislivello al valore di 7.5 cm rappresenta la configurazione più valida in questo ambito.

In Tabella 6.22 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, in presenza di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m. Viene inoltre considerato un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo di 7.5 cm.

Le configurazioni proposte nell'ambito del presente capitolo sottolineano quindi l'importanza del ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata che, in sua assenza, entrerebbe direttamente all'interno della rete fognaria bianca.

Capitolo 7

Aree verdi C

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi delle aree verdi A e B (vedasi capitolo 5 e capitolo 6), l'attenzione si è focalizzata su altre due zone verdi, corrispondenti alle aree verdi C indicate al paragrafo 3.3. Esse sono situate all'interno della Cittadella del Politecnico di Torino, fra la sede della General Motors e Corso Castelfidardo. In Figura 7.1(a) ne viene riportata una foto aerea (in cui le aree verdi sono delimitate da una linea rossa), mentre in Figura 7.1(b) una foto ripresa sul luogo.

Le due zone verdi sono state scelte in base all'ampiezza propria e della potenziale superficie convogliata, oltre che per la disponibilità di informazioni precise sulla rete fognaria bianca. Esse presentano caratteristiche analoghe fra loro, sia come ampiezza che come tipologia di terreno: per questo motivo si è scelto di valutarle come se fossero un'unica entità. Da questo punto in poi verrà utilizzato il termine "area verde C" facendo riferimento ad entrambe le zone analizzate.

7.1 Analisi delle caratteristiche dell'area verde e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche

In primo luogo sono state valutate le caratteristiche principali dell'area verde esaminata: in questo frangente è stata indispensabile la planimetria fornita dall'Edilog. Grazie al software *AutoCAD*, è stata misurata l'ampiezza dell'area verde (A_{verde}), pari a $5386.379 m^2$. Per quanto riguarda le altre caratteristiche, non erano disponibili dati rilevati in sito. Si è effettuato lo stesso ragionamento applicato all'area verde A (vedasi paragrafo 5.1), ipotizzando un terreno da



(a) Foto aerea: zone verdi delimitate da una linea rossa (fonte: Google Earth)



(b) Foto ripresa sul luogo

Figura 7.1: Foto delle aree verdi C

Tabella 7.1: *Caratteristiche di un terreno da giardino sabbioso*

Parametro	Simbolo	Valore
Porosità	ϕ	0.4
Saturazione iniziale	s_0	0.2 - 0.4
Spessore	S	a partire da 0.2 m
Parametri di Horton	f_0	584.5 mm/h
	f_c	45.7 mm/h
	k	32.71 h ⁻¹

giardino di tipo sabbioso. Sono quindi stati assegnati ai parametri dell'area verde i medesimi valori utilizzati per la zona verde A, sinteticamente richiamati in Tabella 7.1.

In secondo luogo sono stati determinati l'ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) e il tempo di corrivazione (t_c) relativi all'area verde, facendo riferimento alla planimetria a disposizione. Innanzitutto è stata valutata l'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la zona verde, analizzando la pendenza del terreno e la posizione dei pluviali degli edifici vicini: è stato necessario effettuare dei sopralluoghi per compensare l'eventuale mancanza di dati. In primo luogo si è potuto constatare che i pluviali della General Motors sono interni all'edificio e per individuarne la posizione si è fatto riferimento soltanto alla planimetria a disposizione. Sulla base delle informazioni acquisite, si è quindi ipotizzato di dirigere i pluviali della General Motors verso la zona verde. Si è inoltre appurato che l'area verde si trova ad una quota inferiore rispetto ai cordoli che la delimitano: la differenza fra i due livelli risulta variabile e presenta un massimo di circa 14 cm. Si è quindi ipotizzato di regolare il terreno, in modo tale che la differenza tra il suo livello e quello dei cordoli si mantenga pari al valore massimo. Quest'ultimo è stato assunto come valore da assegnare al dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p). Si è quindi ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato (vedasi paragrafo 7.4). In questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde.

In Figura 7.2 vengono riportati l'area convogliata e il percorso di più lungo con cui l'acqua di pioggia arriva all'area verde, corrispondente al tratto che unisce il tetto della General Motors e la zona verde.

Grazie al software *AutoCAD* è stato possibile misurare sulla planimetria i seguenti dati:

- ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) = 4984.957 m²
- lunghezza del percorso di corrivazione (L_{pr}) = 10.75 m (corrispondente al tratto di collegamento tra il tetto della General Motors e l'area verde, indicato in Figura 6.2(b))

Dopo aver determinato la lunghezza del percorso di corrivazione, ci si è focalizzati sulla valutazione del tempo di corrivazione (vedasi equazione (4.3)). Per quanto riguarda gli altri parametri necessari al calcolo, sono state avanzate le stesse ipotesi applicate all'area verde A:

- tempo di ingresso in rete (t_{ir}) = 1.5 min
- velocità di percorso della rete (v_{pr}) = 0.75 m/s

Basandosi sui dati forniti, è stato ottenuto un tempo di corrivazione (t_c) pari a $2.90 \cdot 10^{-2}$ h (circa 2 min).

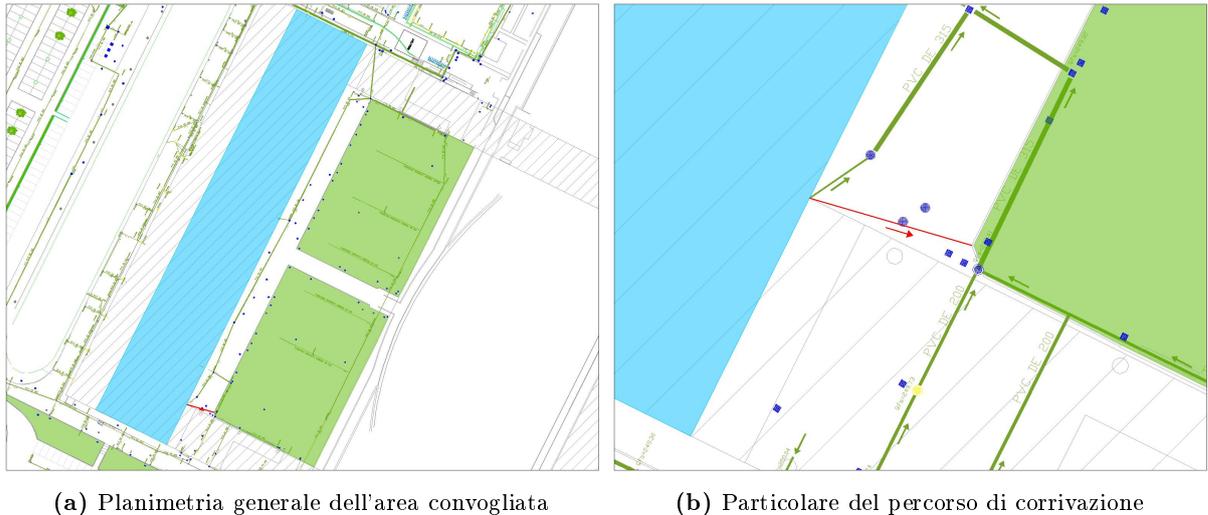


Figura 7.2: Planimetria dell'area analizzata. Si riportano in azzurro l'area convogliata, in verde la superficie verde, in tratteggiato grigio gli edifici, con cerchi o quadrati grigi le caditoie, con cerchi o quadrati blu i tombini, in linea verde la rete fognaria bianca e in linea rossa il percorso di corrivazione

7.2 Analisi dell'andamento delle precipitazioni

Per quanto riguarda l'andamento delle precipitazioni sull'area considerata, si è fatto riferimento al servizio "Atlante delle piogge intense" elaborato da Arpa Piemonte [11], che consente di ricavare in qualsiasi punto del territorio piemontese le curve di probabilità pluviometrica, per un assegnato periodo di ritorno e per durate da 10 *min* a 24 *h*.

Focalizzandosi sul comune di Torino, si è potuto constatare che i dati di altezza di pioggia (h_p) individuati in funzione della durata sono gli stessi che sono stati utilizzati per l'area verde A, poiché le due aree verdi si collocano all'interno della medesima zona. Sono quindi state applicate le curve di probabilità pluviometrica ricostruite al paragrafo 5.2.

7.3 Analisi del processo di infiltrazione

Partendo dai dati presentati ai paragrafi precedenti, è stato implementato sulla zona verde il programma elaborato mediante il software *MATLAB*. Si è scelto di analizzare l'area verde su un arco temporale da 0 a 5 *h*, discretizzato in passi di ampiezza 0.001 *h*, fissando il tempo di ritorno (T) a 2 *anni*.

In primo luogo è stato esaminato l'andamento dell'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la superficie verde (vedasi Figura 7.3(a)): partendo dal valore nullo, essa aumenta seguendo un percorso rettilineo fino ad arrivare ad un massimo di 4984.957 m^2 , in corrispondenza del tempo di corrivazione. Da questo istante in poi si mantiene costante all'aumentare del tempo di precipitazione. In Figura 7.3(b) viene riportato un focus sulla porzione di grafico più rilevante, relativa al tratto di crescita del parametro.

Si è poi passati a valutare l'intensità di pioggia sulla base dell'andamento delle precipitazioni caratteristico dell'area considerata (vedasi equazione (4.6)). In questo frangente è però emerso un problema legato al fatto che le curve di probabilità pluviometrica coprono un arco temporale da 10 *min* a 24 *h* mentre l'area verde viene studiata a partire dall'istante 0. A causa della mancanza di dati relativi alle altezze di pioggia da 0 a 10 *min*, si è ipotizzato di mantenere l'intensità di pioggia costante su questo arco temporale, eguagliandola al valore che essa stessa assume in corrispondenza di un tempo pari a 10 *min*. In Figura 7.4 viene riportato il risultato ottenuto: il parametro parte da un valore pari a $1.25 \cdot 10^{-1} m/h$, si mantiene costante e poi decresce all'au-

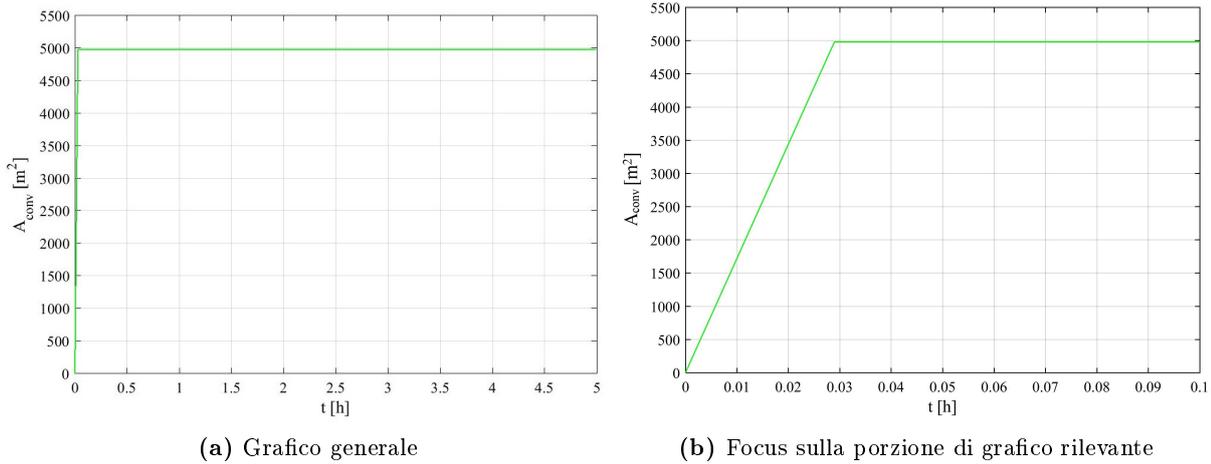


Figura 7.3: Andamento dell'ampiezza dell'area convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

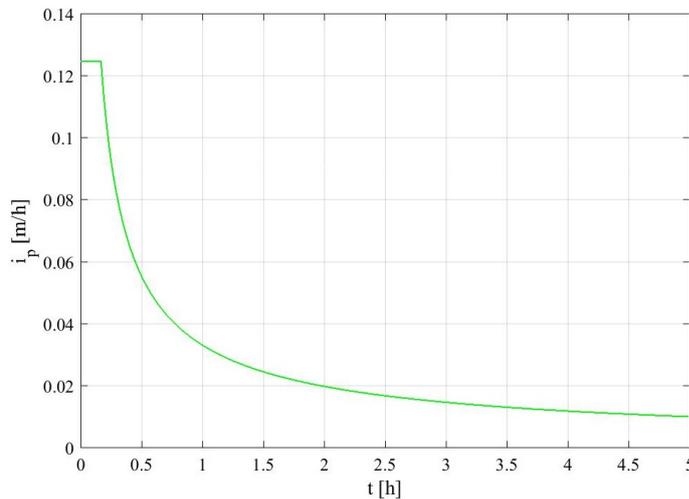


Figura 7.4: Andamento dell'intensità di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

mentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Sulla base dei risultati ottenuti e dei dati a disposizione è stato quindi possibile analizzare la portata in ingresso, pari alla somma tra la portata di pioggia e la portata convogliata (vedasi equazione (4.5)).

Il primo dei due contributi, calcolato mediante l'equazione (4.7), presenta l'andamento riportato in Figura 7.5: partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino ad un massimo di $672.43 \text{ m}^3/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Per quanto riguarda il secondo contributo alla portata in ingresso, calcolato mediante l'equazione (4.8), si rimanda al grafico riportato in Figura 7.6: partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $622.32 \text{ m}^3/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Si è quindi potuto analizzare l'andamento della portata in ingresso (vedasi Figura 7.7): partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $1294.75 \text{ m}^3/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Valutata la portata in ingresso, si è passati a valutare l'intensità di arrivo sulla base dell'equazione (4.9): l'andamento ottenuto è riportato in Figura 7.8. Partendo da 0, il parametro cresce fino

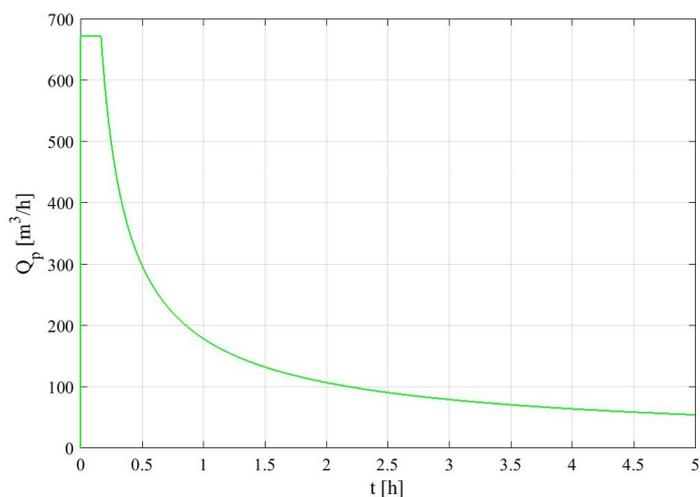


Figura 7.5: Andamento della portata di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

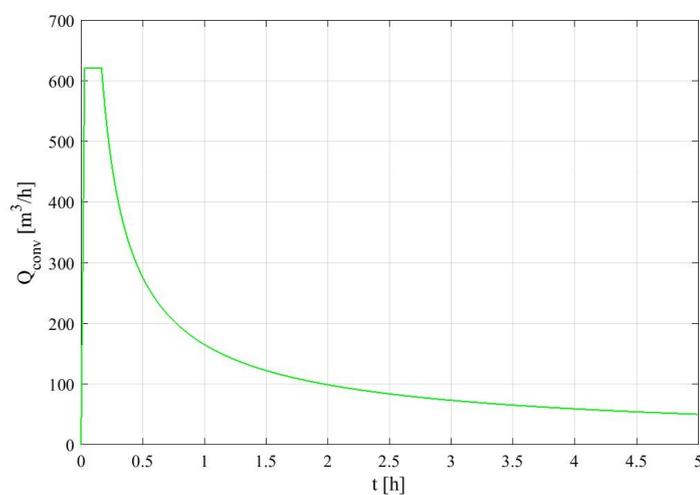


Figura 7.6: Andamento della portata convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

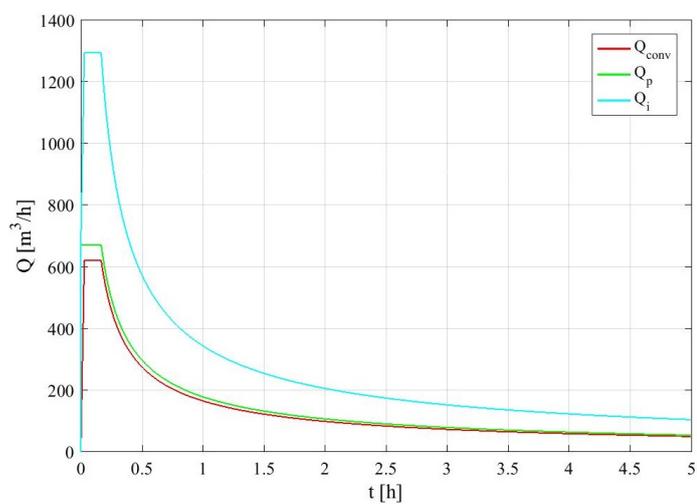


Figura 7.7: Andamento della portata in ingresso Q_i in funzione del tempo, confrontata con la portata convogliata Q_{conv} e la portata di pioggia Q_p (periodo di ritorno = 2 anni)

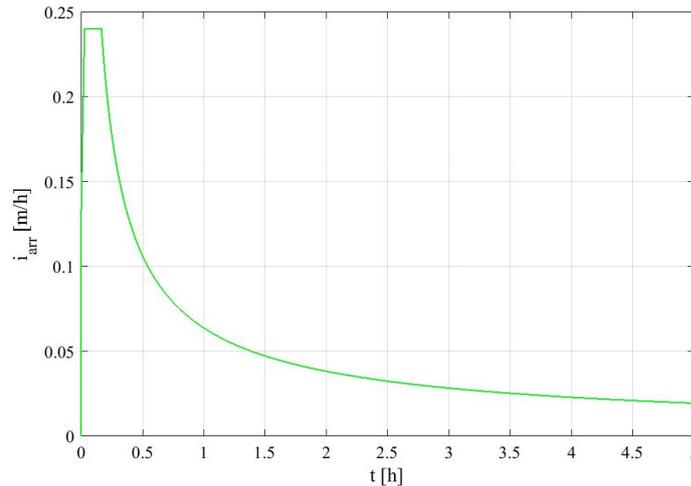


Figura 7.8: Andamento dell'intensità di arrivo in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

ad un massimo di $2.40 \cdot 10^{-1} \text{ m/h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo, è stato necessario esaminare l'andamento della capacità d'infiltrazione, per poterle confrontare e definire il comportamento dell'area verde nel ricevere la portata in ingresso. Sulla base delle considerazioni emerse dallo studio della zona verde A, si è scelto di far riferimento alla legge di Horton, che si è dimostrata il modello più preciso fra quelli presi in esame. La capacità d'infiltrazione è stata quindi eguagliata al tasso di infiltrazione potenziale (f_p), il cui andamento è già stato analizzato nell'ambito dello studio sulla prima area verde. Infatti la tipologia di terreno esaminata è la stessa e, di conseguenza, anche i parametri del modello di Horton restano invariati: si rimanda quindi al paragrafo 5.3.2.

Nell'ambito della presente analisi, è stato necessario affrontare il seguente problema, allo scopo di attribuire un valore al grado di saturazione iniziale (s_0). Il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale (f_0), riportato al paragrafo 7.1, corrisponde ad un grado di saturazione pari a 0. Il grado di saturazione iniziale per un terreno da giardino sabbioso si inserisce però in un range che va da 0.2 a 0.4. Allo scopo di quantificare il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale, è necessario conoscere la relazione tra il parametro stesso e il grado di saturazione per un terreno di tipo sabbioso: è stato quindi ricercato del materiale, senza però reperire documenti pertinenti. Di conseguenza, si è scelto di procedere ipotizzando un grado di saturazione iniziale pari a 0, di cui è noto il corrispondente tasso di infiltrazione potenziale. Infine è stato ipotizzato uno spessore (S) della zona verde pari a 0.2 m.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo e la capacità d'infiltrazione, è stato possibile determinare l'andamento della portata in uscita: in Figura 7.9 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). Dall'istante iniziale a 2 min circa, la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Superato il periodo iniziale di 2 min, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che aumenta progressivamente nel tempo. All'istante di 1 h e 32 min l'area verde raggiunge la condizione di saturazione e, di conseguenza, la portata in ingresso va ad alimentare totalmente la lama d'acqua accumulata sulla superficie. Quest'ultima cresce progressivamente, fino a riuscire a superare il bordo dello stramazzo: a 3 h e 19 min circa va quindi ad instaurarsi la portata in uscita. Il parametro raggiunge un massimo di $141.41 \text{ m}^3/\text{h}$ e poi decresce in funzione del tempo di precipitazione,

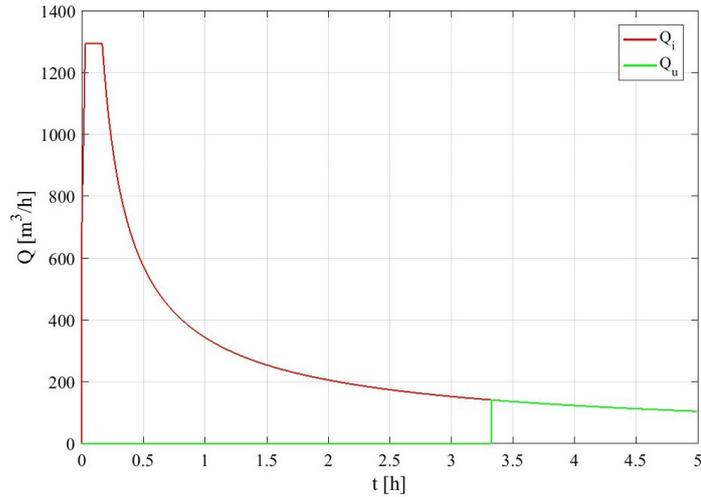


Figura 7.9: Confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

Tabella 7.2: Parametri di prestazione dell'area verde (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
3.33	0.11	1185.00	1.53

seguendo l'andamento della portata in ingresso.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $5.23 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}): i valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.2. I risultati raggiunti sono stati positivi, mettendo in evidenza il ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata in ingresso. Considerando l'entità della portata stessa, la zona verde riesce sia a bloccarne una quota consistente, come evidenziato dal valore assunto dal volume trattenuto, sia a ridurne notevolmente il picco, come evidenziato dal valore assunto dal tasso di abbattimento. Inoltre il ruolo svolto dall'area verde va a coprire un intervallo di circa 1 h e 32 min, che rappresenta il tempo di raggiungimento della saturazione. Terminata però la fase di assorbimento da parte dell'area verde, entra in gioco la fase di accumulo di acqua di piovana su di essa: ne consegue che il tempo che la portata in uscita impiega ad instaurarsi è moderatamente elevato, pari circa a 3 h e 19 min.

Si è quindi deciso di esaminare la zona verde facendo variare i dati di input: in primo luogo si è agito sul tempo di ritorno, esaminando l'influenza di questo cambiamento sulla portata in uscita e, di conseguenza, sui parametri di prestazione dell'area verde. In secondo luogo si è scelto di far variare lo spessore e la tipologia terreno e si è ipotizzato l'inserimento di materiale alveolare, con l'obiettivo di individuare la configurazione migliore per ridurre la portata in ingresso.

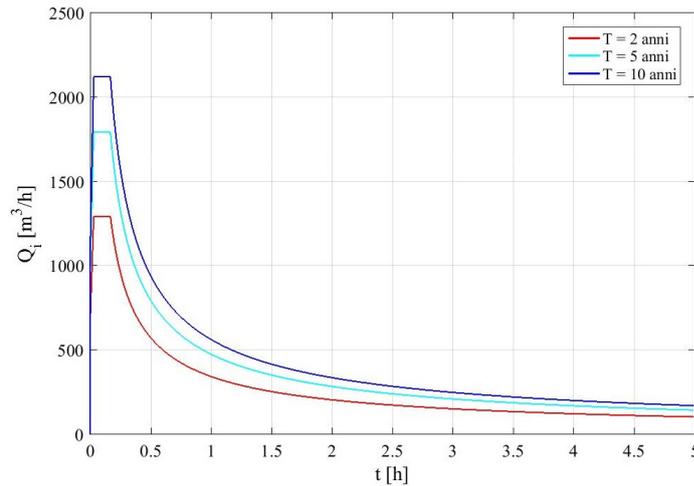


Figura 7.10: Andamento della curva della portata in ingresso Q_i al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

7.3.1 Confronto al variare del tempo di ritorno

Il primo confronto è stato effettuato facendo variare il tempo di ritorno (T): sono stati considerati i valori 2 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 10 *anni* e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sugli andamenti della portata in ingresso e della portata in uscita.

Il primo parametro esaminato è la portata in ingresso (vedasi Figura 7.10): la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 *anni*, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 *anni* e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 *anni*. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in ingresso assume valori progressivamente maggiori. Questo comportamento è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento dell'altezza di pioggia, dell'intensità di pioggia ed infine dei due contributi alla portata in ingresso.

Il secondo parametro esaminato è la portata in uscita (vedasi Figura 7.11): la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 *anni*, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 *anni* e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 *anni*. Confrontando le tre curve si può constatare

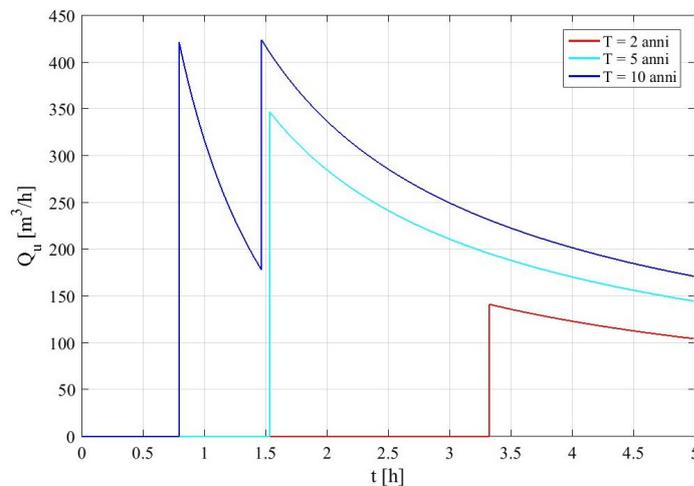


Figura 7.11: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a 0.79 h, istante in cui la curva blu si discosta dal valore nullo; la curva rossa e quella azzurra continuano a coincidere fino a 1.53 h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

Tabella 7.3: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
2	3.33	0.11	1185.00	1.53
5	1.53	0.19	1185.00	1.49
10	0.79	0.20	1185.00	1.47

che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in uscita si instaura progressivamente in anticipo ed assume valori maggiori. Si può inoltre individuare una differenza di andamento tra la curva blu e le curve azzurra e rossa: per spiegare questo cambiamento, è necessario effettuare le seguenti considerazioni. L'aumento del tempo di ritorno determina un aumento della portata in ingresso e, di conseguenza, dell'intensità di arrivo mentre la capacità d'infiltrazione rimane invariata: si verifica quindi un aumento del volume di acqua piovana che va ad accumularsi sulla superficie verde. Ne consegue un anticipo dell'istante in cui la lama d'acqua supera il bordo dello stramazzo e va a determinare l'instaurarsi di una portata in uscita. Inoltre nel caso della curva blu, questo anticipo è tale che lo strato d'acqua accumulato supera il bordo dello stramazzo prima che l'area verde raggiunga la condizione di saturazione, a differenza di quanto avviene per le altre due curve. I due picchi presentati dalla curva blu coincidono quindi rispettivamente con il superamento dello stramazzo ed il raggiungimento della saturazione, in seguito al quale la curva della portata in uscita va a coincidere con la portata in ingresso.

I risultati ottenuti per tempi di ritorno di 5 e 10 *anni* sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $7.24 \cdot 10^{-2} m^3$ e $8.56 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del tempo di ritorno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.3. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un lieve peggioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. L'unico parametro che rimane invariato è il volume trattenuto dall'area verde, su cui il tempo di ritorno non va ad incidere.

7.3.2 Confronto al variare dello spessore

Il secondo confronto è stato effettuato facendo variare lo spessore dell'area verde (S) ed esaminando il modo in cui questo cambiamento influisce sulla portata in uscita. Sono stati considerati valori di spessore pari a 0.2 (corrispondente al caso iniziale) e 0.5 m. È stato inoltre analizzato il caso in cui l'area verde non presenti un limite inferiore e non possa giungere alla saturazione: il drenaggio dell'acqua di pioggia continua perciò durante l'intero evento di precipitazione.

Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 15 h.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 7.12: la curva rossa corrisponde ad uno spessore di 0.2 m, la curva azzurra ad uno spessore di 0.5 m e la curva blu ad uno spessore illimitato.

Mettendo a confronto in primo luogo la curva azzurra con quella rossa è emerso che, all'aumen-

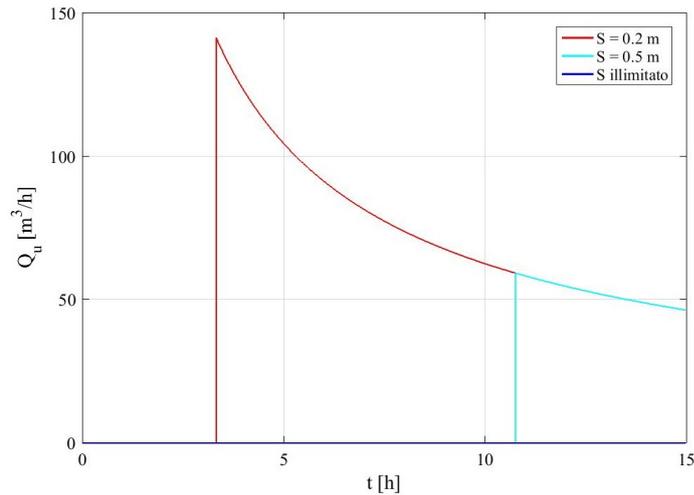


Figura 7.12: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare dello spessore S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a 3.32 h, istante in cui la curva rossa si discosta dal valore nullo; la curva rossa e quella azzurra continuano a coincidere fino a 10.77 h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

tare dello spessore dell'area verde, si verifica un ritardo dell'istante in cui si instaura la portata in uscita. In questo frangente però risulta opportuno effettuare le seguenti considerazioni.

All'istante di 1 h e 34 min circa, la capacità d'infiltrazione torna ad essere superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde. Il cambiamento appena descritto non influenza la curva rossa, poiché l'area verde ha già raggiunto la condizione di saturazione: tutta la portata in ingresso va ad alimentare lo strato d'acqua piovana accumulato sulla superficie. Diverso è invece quanto accade per la curva azzurra, poiché l'area verde non ha ancora raggiunto la saturazione, essendo aumentato lo spessore e, di conseguenza, il volume stoccabile: tutto il volume in ingresso va quindi ad infiltrarsi all'interno dell'area verde. In questa fase la capacità d'infiltrazione è tale da permettere all'area verde di assorbire non solo il volume in ingresso ma anche una quota di quello accumulato. Nell'istante in cui la zona verde raggiunge la saturazione, la portata in ingresso va ad alimentare totalmente lo strato d'acqua accumulato sulla superficie che cresce progressivamente nel tempo, fino a superare il bordo dello stramazzone: va quindi ad instaurarsi una portata in uscita.

Mettendo poi a confronto la curva blu con quella rossa, sono emerse le stesse considerazioni presentate nell'analisi precedente. L'unica differenza rilevata è legata al fatto che, per la curva blu, l'area verde non raggiunge la condizione di saturazione: ne consegue che tutto il volume accumulato viene assorbito e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

I risultati ottenuti per uno spessore di 0.5 m e per uno illimitato sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $1.23 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ e $1.76 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso nei tre casi analizzati, è stato possibile valutare l'influenza dello spessore sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.4. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto, sia del tempo di raggiungimento della saturazione e una

Tabella 7.4: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di instaurazione della portata in uscita o di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	3.33	0.11	1185.003	1.53
0.5	10.77	0.05	1831.369	4.15
illim	n.d.	0	illim	n.d.

Tabella 7.5: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T e dello spessore S (grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di instaurazione della portata in uscita o di raggiungimento della saturazione "non definito"

T [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim
2	10.77	n.d.	0.05	0	1831.37	illim	4.15	n.d.
5	1.67		0.09		1831.37	illim	4.11	n.d.
10	0.79		0.20		1831.37	illim	4.09	n.d.

diminuzione del tasso di abbattimento.

Dal confronto fra i tre casi analizzati, le configurazioni migliori risultano essere quelle in cui lo spessore dell'area verde è rispettivamente pari a 0.5 m e illimitato. In particolare il secondo schema appare il più efficace, poiché non vi è la presenza di uno strato inferiore che limiti il volume stoccabile dal mezzo e il processo di infiltrazione continua per tutta la durata della precipitazione.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare le due configurazioni proposte facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.5. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un lieve peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 7.3.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita e un aumento del tasso di abbattimento. Inoltre nel caso di uno spessore pari a 0.5 m, si verifica anche una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, le due soluzioni proposte risultano comunque valide: in particolare la configurazione che presenta uno spessore illimitato viene confermata come la migliore, poiché l'area verde non presenta limiti di volume trattenuto e non raggiunge la condizione di saturazione, anche in caso di aumento del tempo di ritorno. In questo frangente risulta necessario sottolineare che potrebbe non essere consentita la presenza di uno spessore illimitato, ad esempio nel caso in cui l'area sia soggetta a problemi di inquinamento e risulti opportuno inserire uno strato che la limiti inferiormente.

7.3.3 Confronto al variare della tipologia di terreno

Il terzo confronto è stato effettuato facendo variare la tipologia di terreno: si è quindi ipotizzato di sostituire la sabbia con la ghiaia (vedasi paragrafo 3.3.2), analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita.

Sulla base dello studio effettuato sull'area verde A (vedasi paragrafo 5.3.2.5), si è deciso di assegnare alla porosità il valore 0.45 [3] ed eguagliare la capacità d'infiltrazione alla conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}), fissandone il valore a 10^{-4} m/s [7].

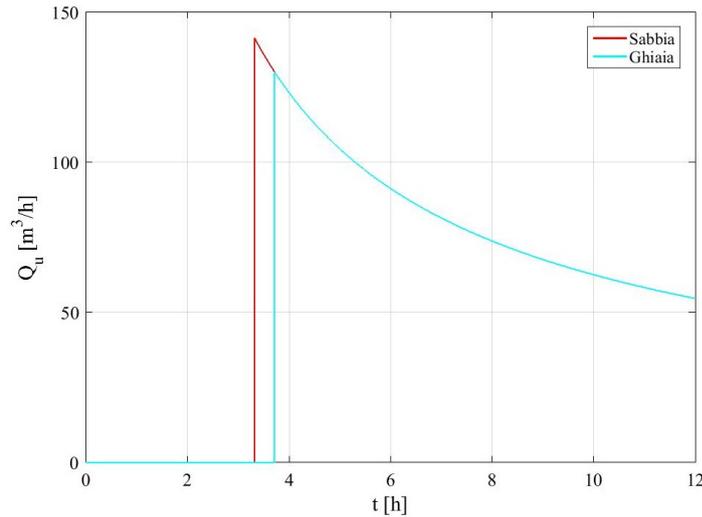


Figura 7.13: Andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare della tipologia di terreno (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m). Si può notare che le due curve coincidono fino a 3.33 h, istante in cui la curva rossa si discosta dal valore nullo. Le due curve tornano a coincidere a 3.72 h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 12 h.

È stato effettuato un confronto fra il caso in cui è presente terreno sabbioso e quello in cui è presente terreno ghiaioso ed il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 7.13: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno ghiaioso. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla tipologia di terreno. In questo frangente è necessario esaminare il comportamento di un terreno ghiaioso, dal momento che quello di un terreno sabbioso è stato analizzato in precedenza.

Considerando quindi la curva azzurra, per tutto il tempo dell'analisi la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. Non si verifica quindi alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Dall'istante di raggiungimento della saturazione dell'area verde, il volume in ingresso inizia ad accumularsi sulla superficie verde, fino a raggiungere il bordo dello stramazzone e a determinare l'instaurarsi di una portata in uscita.

La capacità d'infiltrazione relativa alla curva azzurra risulta sempre superiore a quella relativa alla curva rossa: ne consegue che per la curva azzurra l'area verde raggiunge la condizione di saturazione in anticipo rispetto a quanto avviene per la curva rossa.

Dall'altra parte però, in base alle dinamiche precedentemente descritte, la portata in uscita si instaura prima per la curva rossa e poi per la curva azzurra: di conseguenza, il picco raggiunto dalla curva azzurra risulta minore rispetto a quello raggiunto dalla curva rossa.

Il risultato ottenuto sostituendo il terreno sabbioso con un terreno ghiaioso è stato validato dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.74 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della tipologia di terreno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}).

Tabella 7.6: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare della tipologia di terreno (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

Materiale	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
Sabbia	3.33	0.11	1185.003	1.53
Ghiaia	3.72	0.10	1238.87	$5.07 \cdot 10^{-1}$

Tabella 7.7: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (terreno ghiaioso, tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	3.72	0.10	1238.87	$5.07 \cdot 10^{-1}$
0.5	13.22	0.04	1966.03	6.25

I valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.6. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che la sostituzione del terreno sabbioso con uno ghiaioso determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde. Contemporaneamente si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione diminuisce.

Dal confronto fra i due casi analizzati, la configurazione migliore risulta quella in cui è presente terreno ghiaioso.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare lo spessore dell'area verde da 0.2 m a 0.5 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.7. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 7.3.2). Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde, sia del tempo di raggiungimento della saturazione e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m. Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.8. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 7.3.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verificano dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

Tabella 7.8: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (terreno ghiaioso, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	13.22	0.04	1966.03	3.52
5	5.32	0.08	1966.03	1.62
10	3.44	0.11	1966.03	1.12

7.3.4 Confronto in presenza di materiale alveolare

Il quarto confronto è stato effettuato ipotizzando di inserire uno strato di materiale alveolare (avente una porosità pari a 0.9 [7]) al di sotto di uno strato di terreno sabbioso (vedasi paragrafo 3.3.3) ed analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. In questo frangente è ancora il terreno sabbioso a determinare il processo di infiltrazione: la presenza del materiale alveolare influenza solo il valore del massimo volume stoccabile, causandone un aumento.

È stato effettuato un confronto fra il caso in cui vi siano 0.2 m di terreno sabbioso rispetto a quello in cui vi siano 0.15 m di terreno sabbioso (valore minimo affinché possa essere mantenuto un tappeto erboso) sovrastanti 0.05 m di materiale alveolare. Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 12 h.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 7.14: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno sabbioso sovrastante del materiale alveolare. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla presenza del materiale alveolare, che determina un aumento del volume stoccabile: ne consegue un ritardo dell'istante in cui la lama d'acqua supera il bordo dello stramazzone e determina l'instaurarsi della portata in uscita.

I risultati ottenuti in presenza del materiale alveolare sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.74 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della presenza del materiale sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.9. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aggiunta di materiale alveolare determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde, sia del

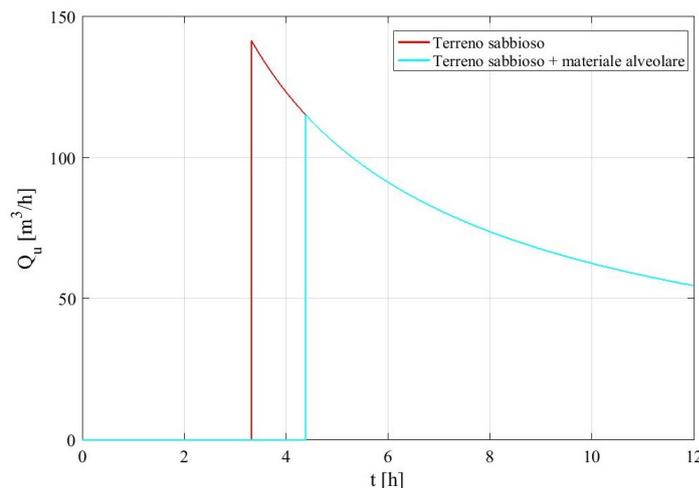


Figura 7.14: Andamento della curva della portata in uscita in presenza di materiale alveolare (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m. Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a 3.33 h, istante in cui la curva rossa si discosta dal valore nullo; nell'istante in cui anche la curva azzurra si discosta dal valore nullo, le due curve tornano a coincidere

Tabella 7.9: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto in presenza di materiale alveolare (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m

Materiale alveolare	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
No	3.33	0.11	1185.00	1.53
Sì	4.38	0.09	1319.66	2.07

Tabella 7.10: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare dello spessore S (presenza di materiale alveolare, periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso resta fisso a 0.15 m, mentre viene fatto variare lo spessore del materiale alveolare da 0.05 m a 0.35 m. Il simbolo "n.d." indica un tempo di instaurazione della portata in uscita "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	4.38	0.09	1319.66	2.07
0.5	n.d.	0	2399.99	14.31

tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione, mentre il tasso di abbattimento diminuisce.

Dal confronto fra i due casi analizzati, la configurazione migliore risulta quella in cui è presente uno strato di materiale alveolare.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare lo spessore dell'area verde da 0.2 m a 0.5 m. Si è mantenuto pari a 0.15 m lo spessore dello strato di sabbia, mentre si è fatto variare lo spessore del sottostante strato di materiale alveolare da 0.05 a 0.35 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.10. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 7.3.2). Infatti si verifica un aumento del volume trattenuto tale per cui tutta la portata in ingresso viene assorbita dall'area verde o va a stagnare su di essa, senza però riuscire a superare il bordo dello stramazzone nell'arco delle 24 h. In questo caso la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 7.11. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 7.3.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Tabella 7.11: Parametri di prestazione dell'area verde: confronto al variare del periodo di ritorno T (presenza di materiale alveolare, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre lo spessore del materiale alveolare è pari 0.35 m. Il simbolo "n.d." indica un tempo di instaurazione della portata in uscita "non definito"

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	n.d.	0	2399.99	14.31
5	1.67	0.04	2399.99	7.94
10	$7.94 \cdot 10^{-1}$	0.20	2399.99	7.92

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

7.4 Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 7.1, si è scelto di regolare il terreno in modo tale che la differenza tra il suo livello e quello dei cordoli si mantenga pari a 14 cm. In questo frangente, si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato: in questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde. Sono state quindi ipotizzate due possibili collocazioni dello scarico: all'estremità superiore e all'estremità inferiore dell'area verde. Per entrambi i casi scelti, è stato individuato il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) e la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), in base alla quale è stata applicata l'equazione (4.27) ed è stato stimato il diametro (ϕ_{luce}).

Bocca di scarico collocata all'estremità superiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità superiore dell'area verde, è necessario far riferimento alla legge di efflusso da una luce a battente (vedasi paragrafo 4.4.1).

Si è quindi ipotizzato che il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) sia pari a 2 h e si è applicata l'equazione (4.31) per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}). Considerando un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo pari a 14 cm, è stato ottenuto un risultato di $1.92 \cdot 10^{-1} m^2$, corrispondente ad un diametro (ϕ_{luce}) di 49 cm. Si è quindi ipotizzato di inserire due bocche di scarico, entrambe di diametro pari a 25 cm.

Bocca di scarico collocata all'estremità inferiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità inferiore dell'area verde, è necessario tenere in considerazione non soltanto il processo di efflusso attraverso di essa ma anche il processo di infiltrazione all'interno del terreno (vedasi paragrafo 4.4.2).

Risulta quindi indispensabile far riferimento sia alla legge di efflusso da una luce a battente, sia alla legge di Darcy. Si è calcolato in primo luogo il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}), utilizzando la legge di Darcy (vedasi equazione 4.35) ed eguagliando la conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}) al parametro f_c del modello Horton. Il valore ottenuto è stato quindi a sua volta adoperato per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), utilizzando la legge di efflusso da una luce a battente. Fissato il valore di dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) a 14 cm, sono stati considerati valori di spessore dell'area verde (S) pari a 0.2 e 0.5 m, conseguendo i risultati riportati in Tabella 7.12. Ne consegue che la presenza di uno spessore pari a 0.2 m richiede un diametro di 46 cm: si è quindi ipotizzato di inserire due bocche di scarico, entrambe di diametro pari a 23 cm. Invece la presenza di uno spessore pari a 0.5 m richiede un diametro di 42 cm: si è quindi ipotizzato di inserire due bocche di scarico, entrambe di diametro pari a 21 cm.

Tabella 7.12: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità inferiore dell'area verde. Si è fatto variare lo spessore dell'area verde (S)

Parametro	$S=0.2 m$	$S=0.5 m$
$t_{svuot} [h]$	2.32	2.70
$\Omega_{luce} [m]$	$16.51 \cdot 10^{-2}$	$14.20 \cdot 10^{-2}$
$\phi_{luce} [cm]$	45.86	42.52

7.5 Conclusioni

Dopo aver analizzato in modo approfondito l'area verde C, è stato possibile individuare le configurazioni migliori allo scopo di ridurre in modo significativo la portata in ingresso. In particolare sono state effettuate delle prove facendo variare una parte dei dati di input del programma, con l'obiettivo di esaminarne gli effetti sull'andamento della portata in uscita e, di conseguenza, sulle prestazioni della zona verde esaminata.

Si è potuto constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un lieve peggioramento della prestazione offerta dall'area verde. Si verifica infatti un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione.

Si è inoltre potuto constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. Si verifica infatti un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto, sia del tempo di raggiungimento della saturazione, mentre il tasso di abbattimento diminuisce.

Infine si è osservato che anche la variazione della tipologia di terreno e l'inserimento di materiale alveolare determinano un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. Nel caso in cui si sostituisca il terreno sabbioso con uno ghiaioso, si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. Invece nel caso in cui si aggiunga del materiale alveolare, si verifica un aumento del volume trattenuto e del tempo di raggiungimento della saturazione.

Dopo aver effettuato diverse prove al variare dei dati di input, sono state individuate le configurazioni migliori per raggiungere l'obiettivo di ridurre in modo significativo la portata in ingresso. La prima configurazione proposta presenta uno spessore illimitato, che consente all'area verde di assorbire l'acqua di pioggia per tutta la durata dell'evento, senza raggiungere la condizione di saturazione e senza che vada ad instaurarsi una portata in uscita. Questa soluzione però non è sempre realizzabile, per le problematiche espresse al paragrafo 7.3.2: in questo frangente si può considerare ottimale una configurazione che presenti uno spessore pari a 0.5 m.

In Tabella 7.13 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, per uno spessore sia pari a 0.5 m sia illimitato.

La seconda configurazione proposta prevede di sostituire il terreno sabbioso con il terreno ghiaioso, di spessore pari a 0.5 m: questa soluzione consente sia di abbattere il picco, sia di trattenere una quota significativa della portata in ingresso.

In Tabella 7.14 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, in presenza di terreno ghiaioso spesso 0.5 m.

La terza configurazione proposta prevede di inserire uno strato di materiale alveolare di spessore pari a 0.35 m al di sotto di uno strato di terreno sabbioso di spessore pari a 0.15 m: questa soluzione consente all'intera portata in ingresso di essere assorbita dall'area verde o di stagnare su di essa, senza però riuscire a superare il bordo dello stramazzone nell'arco delle 24 h.

In Tabella 7.15 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area

Tabella 7.13: Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno spessore di 0.5 m oppure, dove possibile, illimitato (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di instaurazione della portata in uscita o di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.5	10.77	0.05	1831.37	4.15
illim	n.d.	0	illim	n.d.

Tabella 7.14: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui sia presente un terreno ghiaioso spesso 0.5 m (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)*

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
13.22	0.04	1966.03	6.25

Tabella 7.15: *Parametri di prestazione dell'area verde: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno strato di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)*

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
n.d.	0	2399.99	14.31

verde, in presenza di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m.

Le configurazioni proposte nell'ambito del presente capitolo sottolineano quindi l'importanza del ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata che, in sua assenza, entrerebbe direttamente all'interno della rete fognaria bianca.

Capitolo 8

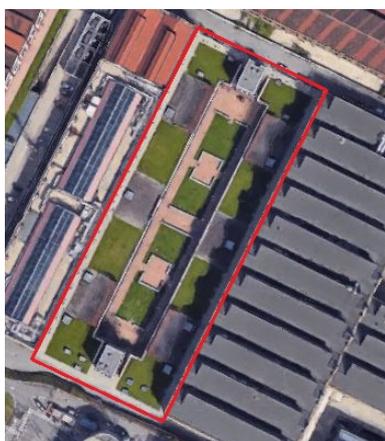
Aree verdi D

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi delle aree verdi A, B e C (vedasi capitolo 5, capitolo 6 e capitolo 7), l'attenzione si è focalizzata su altre dodici zone verdi, corrispondenti alle aree verdi D indicate al paragrafo 3.3. Esse sono situate all'interno della Cittadella del Politecnico di Torino, in corrispondenza della cosiddetta Corte Interrata, tra l'Incubatore Imprese Innovative del Politecnico di Torino (I3P) e l'Istituto Superiore Mario Boella (I.S.M. Boella). In Figura 8.1(a) ne viene riportata una foto aerea (in cui le aree verdi sono delimitate da una linea rossa), mentre in Figura 8.1(b) una foto ripresa sul luogo.

Le zone verdi sono state scelte in base all'ampiezza propria e della potenziale superficie convogliata, oltre che per la disponibilità di informazioni precise sulla rete fognaria bianca.

In questo frangente è stato necessario organizzare le dodici aree verdi in tre gruppi, riportati in Figura 8.2: essi sono delimitati da una linea rossa ed identificati con le lettere D1, D2 e D3.

Il gruppo D1 comprende quattro tetti verdi che presentano caratteristiche analoghe fra loro, sia come ampiezza che come struttura: per questo motivo si è scelto di valutarli come se fossero un'unica entità. Da questo punto in poi verrà utilizzato il termine "area verde D1" facendo riferimento ai quattro tetti verdi considerati. Lo stesso ragionamento è stato applicato sia al secondo gruppo di quattro tetti verdi, d'ora in poi identificato come "area verde D2", sia al gruppo di quattro aree verdi ubicate nel cortile interno della Corte Interrata, d'ora in poi identificato come "area verde D3".



(a) Foto aerea: zone verdi delimitate da una linea rossa (fonte: Google Earth)



(b) Foto ripresa sul luogo

Figura 8.1: Foto delle aree verdi D



Figura 8.2: *Suddivisione delle aree verdi nei gruppi D1, D2 e D3 (delimitati in rosso). Si riportano in grigio gli edifici ed in verde le aree verdi*

8.1 Analisi delle caratteristiche delle aree verdi e del relativo sistema di convogliamento delle acque meteoriche

In primo luogo sono state valutate le caratteristiche principali delle tre aree verdi, andando in seguito ad esaminarne il rispettivo sistema di convogliamento delle acque meteoriche: in questo frangente è stata indispensabile la planimetria fornita dall'Edilog. Per maggior chiarezza, si è ritenuto opportuno distinguere i risultati ottenuti per le diverse aree verdi, approfonditi ai paragrafi 8.1.1, 8.1.2 e 8.1.3.

8.1.1 Area verde D1

Applicando il software *AutoCAD* sulla planimetria a disposizione, è stata misurata l'ampiezza dell'area verde (A_{verde}), pari a $1071.10 m^2$. Per quanto riguarda le altre caratteristiche, si è fatto riferimento alle informazioni fornite dall'Edilog, grazie alle quali è stata ricostruita la struttura dell'area verde: si è quindi individuata la presenza di uno strato di terreno da giardino, sovrastante uno strato di materiale alveolare.

Prendendo in considerazione il primo strato, si è ipotizzato un terreno da giardino di tipo sabbioso, le cui caratteristiche sono state valutate sulla base sia delle informazioni fornite dall'Edilog, sia dell'analisi effettuata sull'area verde A (vedasi paragrafo 5.1), dal momento che non erano disponibili dati rilevati in sito. I parametri assegnati allo strato di terreno da giardino sono quindi riportati in Tabella 8.1.

Prendendo in considerazione il secondo strato, è stata individuata la presenza di materiale alveolare, di spessore pari a $0.06 m$ e porosità pari a 0.9 [7].

L'attenzione si è poi focalizzata sulla valutazione dell'ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) e del tempo di corrivazione (t_c) relativi all'area verde, facendo riferimento alla planimetria a disposizione. Innanzitutto è stata esaminata l'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la zona verde, analizzando la pendenza del terreno e la posizione dei pluviali degli edifici vicini: è stato necessario effettuare dei sopralluoghi per compensare l'eventuale mancanza di dati. In primo luogo si è potuto constatare che i pluviali dell'I3P, che costeggia l'area verde, sono quasi tutti interni all'edificio e per individuarne la posizione si è fatto riferimento soltanto alla planimetria a disposizione. Sulla base delle informazioni acquisite, si è quindi ipotizzato di dirigere i pluviali dell'I3P verso la zona verde. Si è inoltre appurato che l'area verde si trova ad una quota inferiore rispetto ai cordoli che la delimitano: la differenza fra i due livelli risulta pari

Tabella 8.1: *Caratteristiche dello strato di terreno da giardino*

Parametro	Simbolo	Valore
Porosità	ϕ	0.4
Saturazione iniziale	s_0	0.2 - 0.4
Spessore	S	0.2 m
Parametri di Horton	f_0	584.5 mm/h
	f_c	45.7 mm/h
	k	32.71 h ⁻¹

a 13 cm circa. Quest'ultimo è stato assunto come valore da assegnare al dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p). Si è quindi ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato (vedasi paragrafo 8.4). In questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde.

In Figura 8.3 vengono riportati l'area convogliata e il percorso di più lungo con cui l'acqua di pioggia arriva alla zona verde, corrispondente al tratto che unisce il tetto dell'I3P e l'area verde. Grazie al software *AutoCAD* è stato possibile misurare sulla planimetria i seguenti dati:

- ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) = 1737.12 m²
- lunghezza del percorso di corrivazione (L_{pr}) = 19.46 m (corrispondente al tratto di collegamento tra il tetto dell'I3P e l'area verde, indicato in Figura 8.3(b))

Dopo aver determinato la lunghezza del percorso di corrivazione, ci si è focalizzati sulla valutazione del tempo di corrivazione (vedasi equazione (4.3)). Per quanto riguarda gli altri parametri necessari al calcolo, sono state avanzate le stesse ipotesi applicate all'area verde A:

- tempo di ingresso in rete (t_{ir}) = 1.5 min

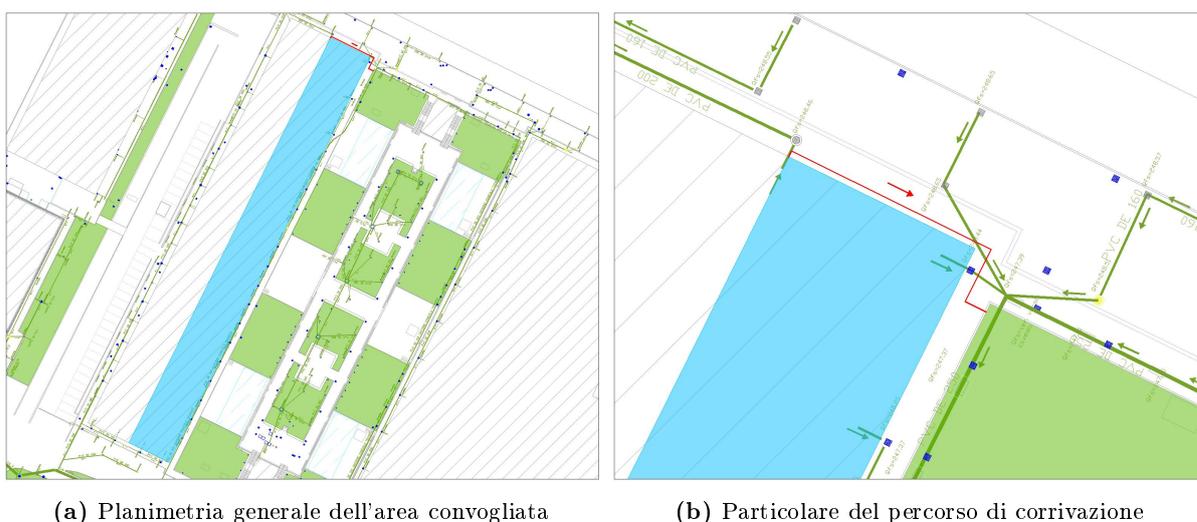


Figura 8.3: *Area verde D1: planimetria della zona analizzata. Si riportano in azzurro l'area convogliata, in verde la superficie verde, in tratteggiato grigio gli edifici, con cerchi o quadrati grigi le caditoie, con cerchi o quadrati blu i tombini, in linea verde la rete fognaria bianca e in linea rossa il percorso di corrivazione*

- velocità di percorso della rete (v_{pr}) = 0.75 m/s

Basandosi sui dati forniti, è stato ottenuto un tempo di corrivazione (t_c) pari a $3.22 \cdot 10^{-2} h$ (circa 2 min).

8.1.2 Area verde D2

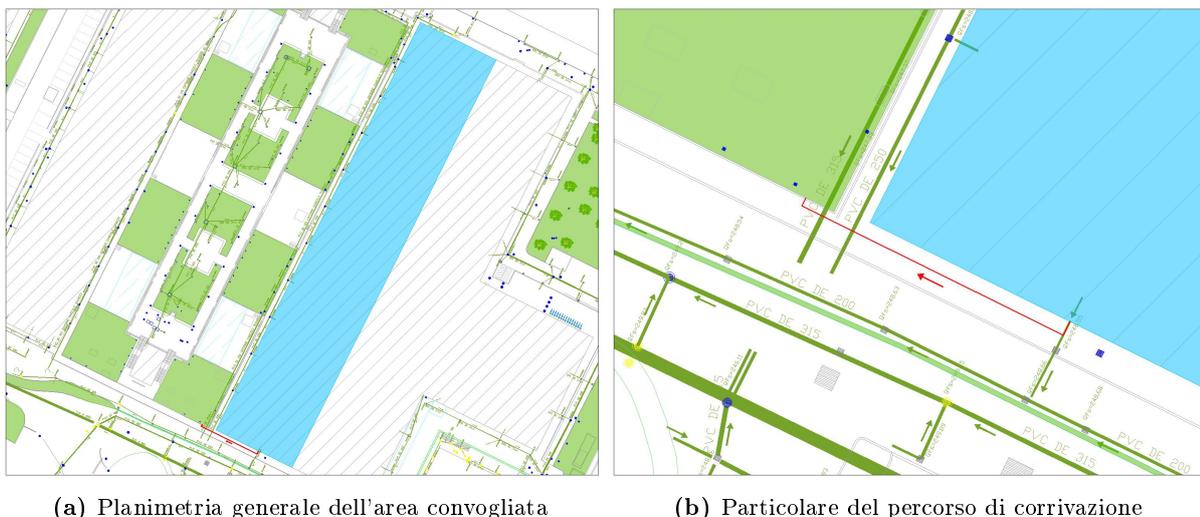
Applicando il software *AutoCAD* sulla planimetria a disposizione, è stata misurata l'ampiezza dell'area verde (A_{verde}), pari a $1089.93 m^2$. Per quanto riguarda le altre caratteristiche, si è fatto innanzitutto riferimento alle informazioni fornite dall'Edilog, grazie alle quali è stata ricostruita la struttura dell'area verde: è stata quindi individuata la stessa configurazione relativa alla zona verde D1 (vedasi paragrafo 8.1.1).

L'attenzione si è poi focalizzata sulla valutazione dell'ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) e del tempo di corrivazione (t_c) relativi all'area verde, facendo riferimento alla planimetria a disposizione. Innanzitutto è stata esaminata l'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la zona verde, analizzando la pendenza del terreno e la posizione dei pluviali degli edifici vicini: è stato necessario effettuare dei sopralluoghi per compensare l'eventuale mancanza di dati. In primo luogo si è ipotizzato di dirigere i pluviali dell'I.S.M. Boella, che costeggia l'area verde, verso quest'ultima. Si è inoltre appurato che l'area verde si trova ad una quota inferiore rispetto ai cordoli che la delimitano: la differenza fra i due livelli risulta pari circa a 13 cm. Quest'ultimo è stato assunto come valore da assegnare al dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p). Si è quindi ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato (vedasi paragrafo 8.4). In questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde.

In Figura 8.4 vengono riportati l'area convogliata e il percorso di più lungo con cui l'acqua di pioggia arriva alla zona verde, corrispondente al tratto che unisce il tetto dell'I.S.M. Boella e la zona verde.

Grazie al software *AutoCAD* è stato possibile misurare sulla planimetria i seguenti dati:

- ampiezza dell'area convogliata (A_{conv}) = $3309.18 m^2$



(a) Planimetria generale dell'area convogliata

(b) Particolare del percorso di corrivazione

Figura 8.4: Area verde D2: planimetria della zona analizzata. Si riportano in azzurro l'area convogliata, in verde la superficie verde, in tratteggiato grigio gli edifici, con cerchi o quadrati grigi le caditoie, con cerchi o quadrati blu i tombini, in linea verde la rete fognaria bianca e in linea rossa il percorso di corrivazione

- lunghezza del percorso di corrivazione (L_{pr}) = 19.78 m (corrispondente al tratto di collegamento tra il tetto dell'I.S.M. Boella e l'area verde, indicato in Figura 8.4(b))

Dopo aver determinato la lunghezza del percorso di corrivazione, ci si è focalizzati sulla valutazione del tempo di corrivazione (vedasi equazione (4.3)). Per quanto riguarda gli altri parametri necessari al calcolo, sono state avanzate le stesse ipotesi applicate all'area verde A:

- tempo di ingresso in rete (t_{ir}) = 1.5 min
- velocità di percorso della rete (v_{pr}) = 0.75 m/s

Basandosi sui dati forniti, è stato ottenuto un tempo di corrivazione (t_c) pari a $3.23 \cdot 10^{-2}$ h (circa 2 min).

8.1.3 Area verde D3

Applicando il software *AutoCAD* sulla planimetria a disposizione, è stata misurata l'ampiezza dell'area verde (A_{verde}), pari a $766.79 m^2$. Per quanto riguarda le altre caratteristiche, non erano disponibili dati rilevati in sito. Si è effettuato lo stesso ragionamento applicato all'area verde A (vedasi paragrafo 5.1), ipotizzando un terreno da giardino di tipo sabbioso. Sono quindi stati assegnati ai parametri dell'area verde i medesimi valori utilizzati per la zona verde A, sinteticamente richiamati in Tabella 8.2.

L'attenzione si è poi focalizzata sulla valutazione del sistema di convogliamento delle acque meteoriche, facendo riferimento alla planimetria a disposizione. Innanzitutto è stata effettuata un'analisi dell'area adiacente la zona verde, effettuando dei sopralluoghi per compensare l'eventuale mancanza di dati. In primo luogo si è potuto constatare che l'area verde è circondata da edifici la cui copertura corrisponde ai tetti verdi identificati come aree verdi D1 e D2. Queste ultime, riprendendo quanto indicato in precedenza, effettuano un'azione di abbattimento sul carico di acqua piovana convogliato rispettivamente dal tetto dell'I3P e dal tetto dell'I.S.M. Boella. Si è quindi ipotizzato di dirigere la portata in uscita dalle zone verdi D1 e D2 verso l'area verde D3, effettuando una seconda azione di abbattimento sul carico di acqua piovana.

Si è inoltre appurato che la zona verde si trova ad una quota inferiore rispetto ai cordoli che la delimitano: la differenza fra i due livelli risulta pari circa a 8 cm. Quest'ultimo è stato assunto come valore da assegnare al dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p). Si è quindi ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato (vedasi paragrafo 8.4). In questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde.

Tabella 8.2: *Caratteristiche di un terreno da giardino sabbioso*

Parametro	Simbolo	Valore
Porosità	ϕ	0.4
Saturazione iniziale	s_0	0.2 - 0.4
Spessore	S	a partire da 0.2 m
Parametri di Horton	f_0	584.5 mm/h
	f_c	45.7 mm/h
	k	32.71 h ⁻¹

8.2 Analisi dell'andamento delle precipitazioni

Per quanto riguarda l'andamento delle precipitazioni sull'area considerata, si è fatto riferimento al servizio "Atlante delle piogge intense" elaborato da Arpa Piemonte [11], che consente di ricavare in qualsiasi punto del territorio piemontese le curve di probabilità pluviometrica, per un assegnato periodo di ritorno e per durate da 10 *min* a 24 *h*.

Focalizzandosi sul comune di Torino, si è potuto constatare che i dati di altezza di pioggia (h_p) individuati in funzione della durata sono gli stessi che sono stati utilizzati per l'area verde A, poiché le aree verdi si collocano all'interno della medesima zona. Sono quindi state applicate le curve di probabilità pluviometrica ricostruite al paragrafo 5.2.

8.3 Analisi del processo di infiltrazione

Sulla base di quanto descritto in precedenza, è risultato necessario articolare lo studio in due fasi, descritte rispettivamente ai paragrafi 8.3.1 e 8.3.2. Nell'ambito della prima fase di analisi è stato esaminato il processo di infiltrazione delle acque meteoriche all'interno delle aree verdi D1 e D2 (prima azione di abbattimento), mentre nel corso della seconda fase di analisi è stato esaminato il processo di infiltrazione delle acque meteoriche all'interno dell'area verde D3 (seconda azione di abbattimento).

8.3.1 Prima fase di studio

Partendo dai dati presentati ai paragrafi precedenti, è stato implementato sulle aree verdi D1 e D2 il programma elaborato mediante il software *MATLAB*. Si è scelto di analizzare le aree verdi su un arco temporale da 0 a 5 *h*, discretizzato in passi di ampiezza 0.001 *h*, fissando il tempo di ritorno (T) a 2 *anni*. I risultati ottenuti per l'area verde D1 vengono riportati al paragrafo 8.3.1.1, mentre quelli ottenuti per l'area verde D2 vengono riportati al paragrafo 8.3.1.2.

8.3.1.1 Area verde D1

In primo luogo è stato esaminato l'andamento dell'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la superficie verde (vedasi Figura 8.5(a)): partendo dal valore nullo, essa aumenta seguendo un percorso rettilineo fino ad arrivare ad un massimo di 1737.12 m^2 , in corrispondenza del tempo di corrivazione. Da questo istante in poi si mantiene costante all'aumentare del tempo

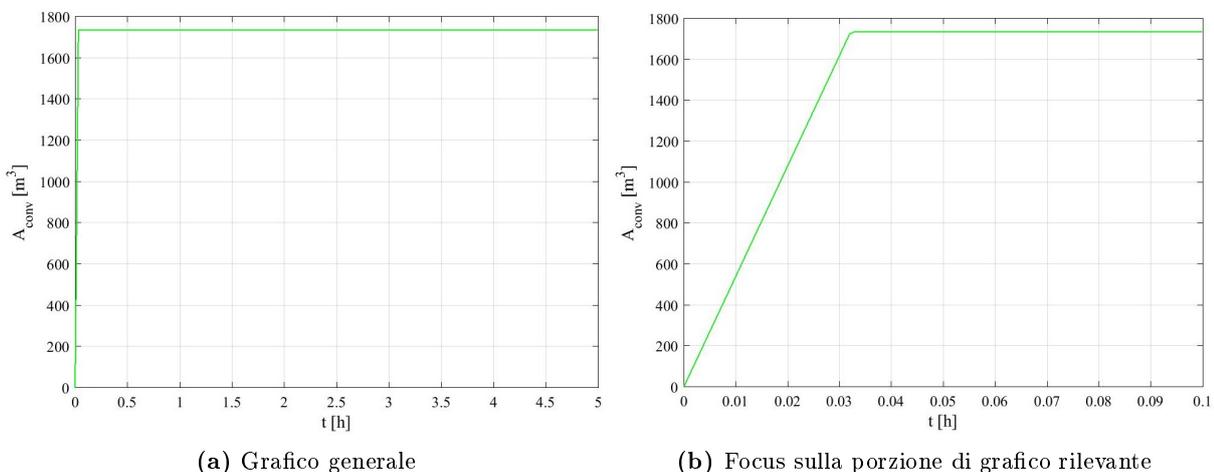


Figura 8.5: Area verde D1: andamento dell'ampiezza dell'area convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

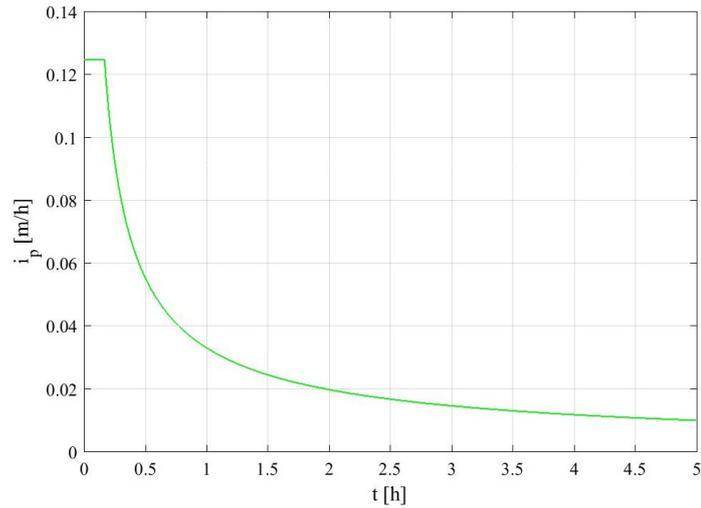


Figura 8.6: Area verde D1: andamento dell'intensità di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

di precipitazione. In Figura 8.5(b) viene riportato un focus sulla porzione di grafico più rilevante, relativa al tratto di crescita del parametro.

Si è poi passati a valutare l'intensità di pioggia, sulla base dell'andamento delle precipitazioni caratteristico dell'area considerata (vedasi equazione (4.6)). In questo frangente è però emerso un problema legato al fatto che le curve di probabilità pluviometrica coprono un arco temporale da 10 *min* a 24 *h* mentre l'area verde viene studiata a partire dall'istante 0. A causa della mancanza di dati relativi alle altezze di pioggia da 0 a 10 *min*, si è ipotizzato di mantenere l'intensità di pioggia costante su questo arco temporale, eguagliandola al valore che essa stessa assume in corrispondenza di un tempo pari a 10 *min*. In Figura 8.6 viene riportato il risultato ottenuto: il parametro parte da un valore pari a $1.25 \cdot 10^{-1} m/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Sulla base dei risultati ottenuti e dei dati a disposizione è stato quindi possibile analizzare la portata in ingresso, pari alla somma tra la portata di pioggia e la portata convogliata (vedasi equazione (4.5)).

Il primo dei due contributi, calcolato mediante l'equazione (4.7), presenta l'andamento riportato

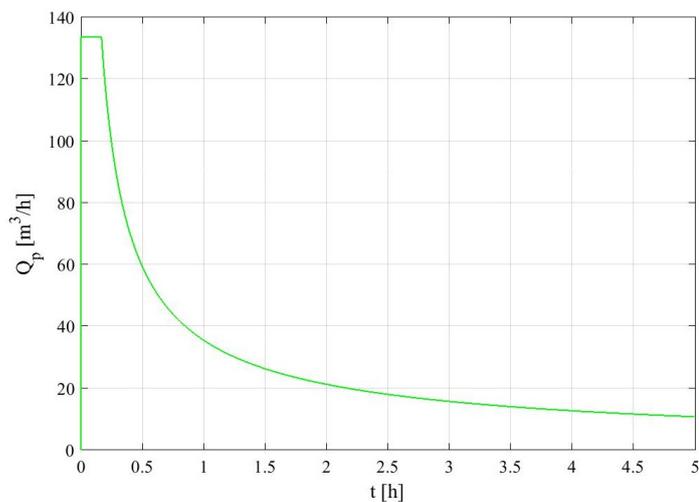


Figura 8.7: Area verde D1: andamento della portata di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

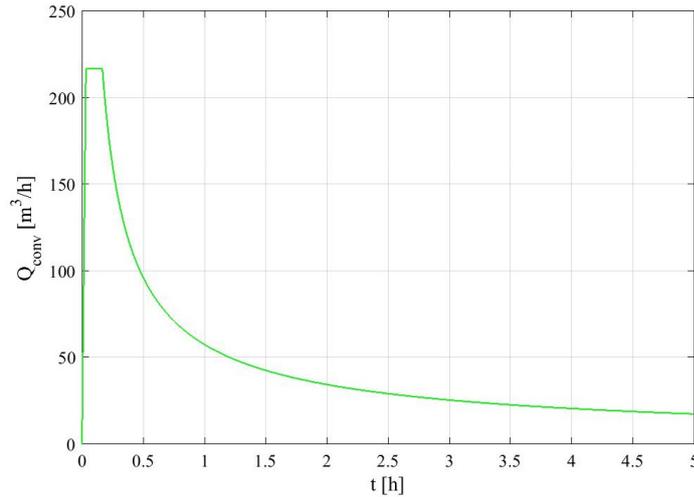


Figura 8.8: Area verde D1: andamento della portata convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

in Figura 8.7: partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino ad un massimo di $133.72 \text{ m}^3/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Per quanto riguarda il secondo contributo alla portata in ingresso, calcolato mediante l'equazione (4.8), si rimanda al grafico riportato in Figura 8.8: partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $216.86 \text{ m}^3/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Si è quindi potuto analizzare l'andamento della portata in ingresso (vedasi Figura 8.9): partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $350.58 \text{ m}^3/h$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Valutata la portata in ingresso, si è passati a valutare l'intensità di arrivo sulla base dell'equazione (4.9): l'andamento ottenuto è riportato in Figura 8.10. Partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $3.27 \cdot 10^{-1} \text{ m/h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo, è stato necessario esaminare l'andamento della capaci-

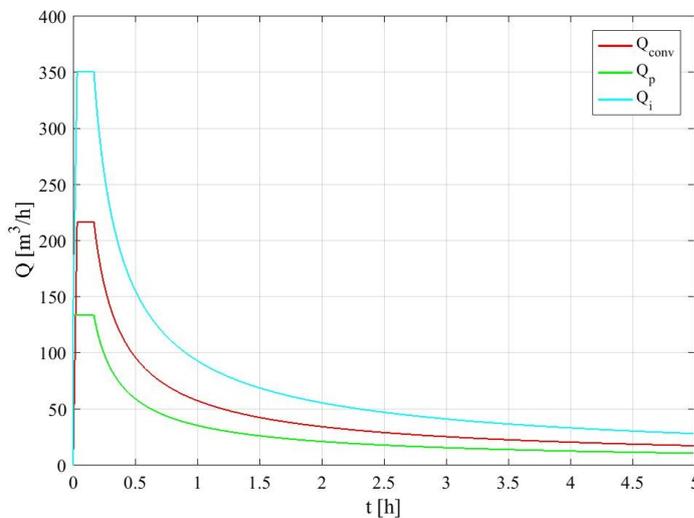


Figura 8.9: Area verde D1: andamento della portata in ingresso Q_i in funzione del tempo, confrontata con la portata convogliata Q_{convv} e la portata di pioggia Q_p (periodo di ritorno = 2 anni)

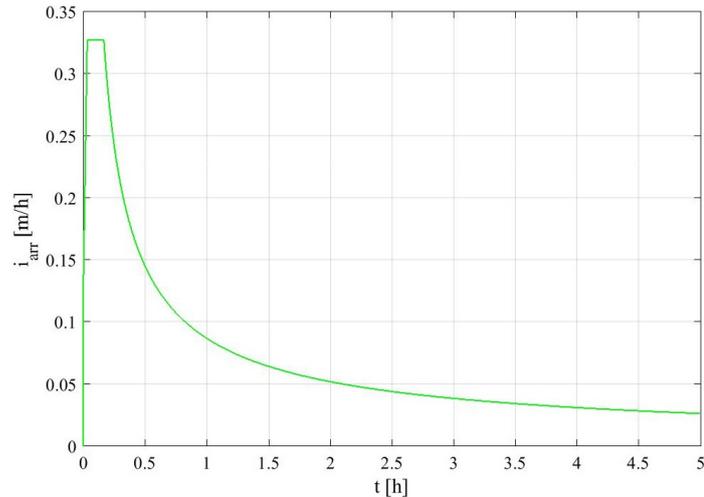


Figura 8.10: Area verde D1: andamento dell'intensità di arrivo in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

tà d'infiltrazione, per poterle confrontare e definire il comportamento dell'area verde nel ricevere la portata in ingresso. Sulla base delle considerazioni emerse dallo studio della zona verde A, si è scelto di far riferimento alla legge di Horton, che si è dimostrata il modello più preciso fra quelli presi in esame. La capacità d'infiltrazione è stata quindi eguagliata al tasso di infiltrazione potenziale (f_p), il cui andamento è già stato analizzato nell'ambito dello studio sull'area verde A. Infatti, nonostante l'area verde D1 presenti uno strato di materiale alveolare, a governare il processo di infiltrazione è lo strato di terreno sabbioso, la cui tipologia coincide con quella della zona verde A (vedasi paragrafo 5.3.2).

Nell'ambito della presente analisi, è stato necessario affrontare il seguente problema, allo scopo di attribuire un valore al grado di saturazione iniziale (s_0). Il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale (f_0), riportato al paragrafo 8.1.1, corrisponde ad un grado di saturazione pari a 0. Il grado di saturazione iniziale per un terreno da giardino sabbioso si inserisce però in un range che va da 0.2 a 0.4. Allo scopo di quantificare il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale, è necessario conoscere la relazione tra il parametro stesso e il grado di saturazione per un terreno di tipo sabbioso: è stato quindi ricercato del materiale, senza però reperire documenti pertinenti. Di conseguenza, si è scelto di procedere ipotizzando un grado di saturazione iniziale pari a 0, di cui è noto il corrispondente tasso di infiltrazione potenziale.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo e la capacità d'infiltrazione, è stato possibile determinare l'andamento della portata in uscita: in Figura 8.11 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). Dall'istante iniziale a 1.5 min circa, la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Superato il periodo iniziale di 1.5 min, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che aumenta progressivamente nel tempo. Nel momento in cui l'acqua accumulata supera il bordo dello stramazzo, la portata in uscita inizia a crescere. Il parametro raggiunge quindi un valore pari a $26.00 \text{ m}^3/\text{h}$ e poi decresce in funzione del tempo di precipitazione. Il repentino aumento che si verifica a 2 h e 41 min circa rappresenta il momento in cui l'area verde raggiunge la saturazione: ne consegue che la portata in ingresso va ad alimentare totalmente quella in uscita. Superato questo istantaneo aumento, la portata in uscita torna a decrescere in funzione del tempo, seguendo l'andamento della portata

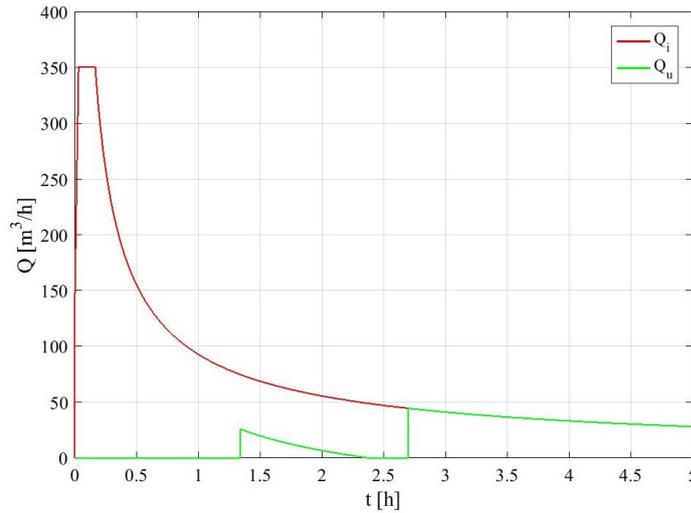


Figura 8.11: Area verde D1: confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

Tabella 8.3: Parametri di prestazione dell'area verde D1 (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
1.34	0.13	282.77	2.69

in ingresso.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $1.42 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}): i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.3. I risultati raggiunti sono stati positivi, mettendo in evidenza il ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata in ingresso. Considerando l'entità della portata stessa, la zona verde riesce sia a bloccare una quota consistente, come evidenziato dal valore del volume trattenuto, sia a ridurre notevolmente il picco, come evidenziato dal valore del tasso di abbattimento. Anche i valori assunti dal tempo in cui si instaura la portata in uscita e dal tempo di raggiungimento della saturazione sono moderatamente elevati, sottolineando ulteriormente l'importanza del ruolo svolto dall'area verde.

Si è deciso di esaminare la zona verde facendo variare il tempo di ritorno e analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita.

Confronto al variare del tempo di ritorno È stato effettuato un confronto al variare del tempo di ritorno (T): sono stati considerati i valori 2 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 10 anni e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. Il risultato ottenuto viene riportato in Figura 8.12: la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 anni, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 anni e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 anni. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in uscita si instaura progressivamente in anticipo ed assume

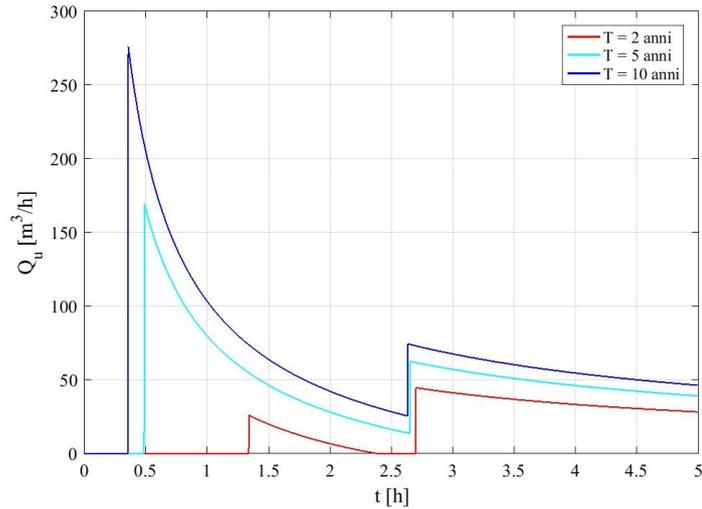


Figura 8.12: Area verde D1: andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a 0.36 h, istante in cui la curva blu si discosta dal valore nullo; la curva rossa e quella azzurra continuano a coincidere fino a 0.49 h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

Tabella 8.4: Parametri di prestazione dell'area verde D1: confronto al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
2	1.34	0.13	282.77	2.69
5	$4.91 \cdot 10^{-1}$	0.35	282.77	2.65
10	$3.60 \cdot 10^{-1}$	0.48	282.77	2.64

valori maggiori. Questi due fattori determinano anche un anticipo dell'istante di raggiungimento della condizione di saturazione dell'area verde, rappresentata dal repentino aumento che si verifica durante la fase di decrescita del parametro. Il comportamento appena descritto è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento dell'altezza di pioggia, dell'intensità di pioggia, della portata in ingresso ed infine della portata in uscita.

I risultati ottenuti per tempi di ritorno di 5 e 10 anni sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $1.96 \cdot 10^{-2} m^3$ e $2.32 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del tempo di ritorno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.4. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. L'unico parametro che rimane invariato è il volume trattenuto dall'area verde, su cui il tempo di ritorno non va ad incidere.

8.3.1.2 Area verde D2

In primo luogo è stato esaminato l'andamento dell'ampiezza dell'area su cui cade la pioggia convogliata verso la superficie verde (vedasi Figura 8.13(a)): partendo dal valore nullo, essa aumenta seguendo un percorso rettilineo fino ad arrivare ad un massimo di 3309.18 m^2 , in corrispondenza del tempo di corrivazione. Da questo istante in poi si mantiene costante all'aumentare del tempo di precipitazione. In Figura 8.13(b) viene riportato un focus sulla porzione di grafico più rilevante, relativa al tratto di crescita del parametro.

Si è poi passati a valutare l'intensità di pioggia, sulla base dell'andamento delle precipitazioni caratteristico dell'area considerata (vedasi equazione (4.6)). Dal momento che i parametri delle curve di probabilità pluviometrica sono gli stessi per tutte le tre aree verdi analizzate, l'andamento dell'intensità di pioggia corrisponde a quanto riportato in Figura 8.6 per la zona verde D1.

Sulla base dei risultati ottenuti e dei dati a disposizione è stato quindi possibile analizzare la portata in ingresso, pari alla somma tra la portata di pioggia e la portata convogliata (vedasi equazione (4.5)).

Il primo dei due contributi, calcolato mediante l'equazione (4.7), presenta l'andamento riportato in Figura 8.14: partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino ad un massimo di $136.07 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Per quanto riguarda il secondo contributo alla portata in ingresso, calcolato mediante l'equazione (4.8), si rimanda al grafico riportato in Figura 8.15: partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $413.12 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Si è quindi potuto analizzare l'andamento della portata in ingresso (vedasi Figura 8.16): partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $549.18 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo. Valutata la portata in ingresso, si è passati a valutare l'intensità di arrivo sulla base dell'equazione (4.9): l'andamento ottenuto è riportato in Figura 8.17. Partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $5.04 \cdot 10^{-1} \text{ m}/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo, è stato necessario esaminare l'andamento della capacità d'infiltrazione, per poterle confrontare e definire il comportamento dell'area verde nel ricevere la portata in ingresso. In questo frangente è stato effettuato lo stesso ragionamento applicato

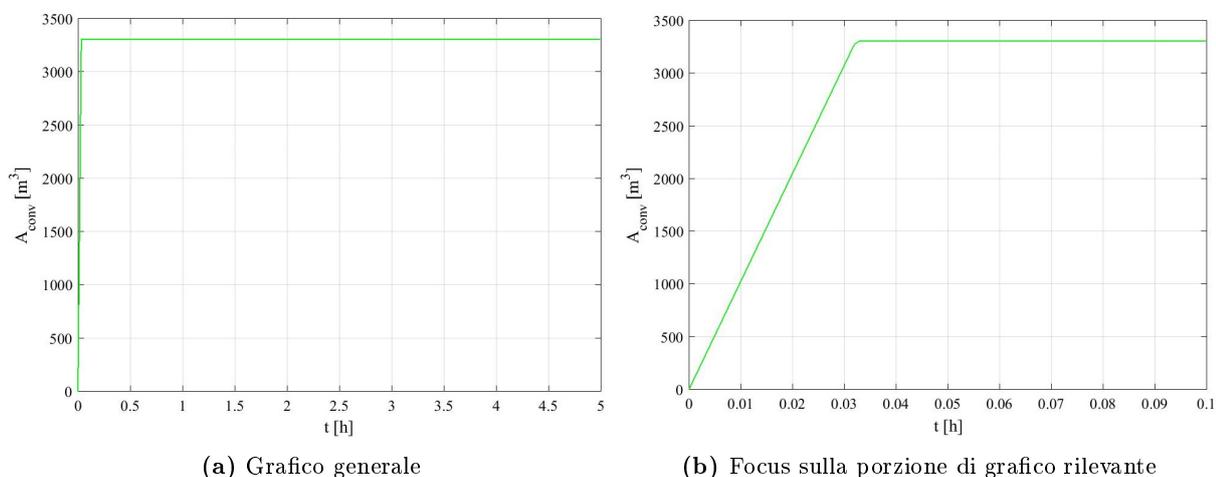


Figura 8.13: Area verde D2: andamento dell'ampiezza dell'area convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

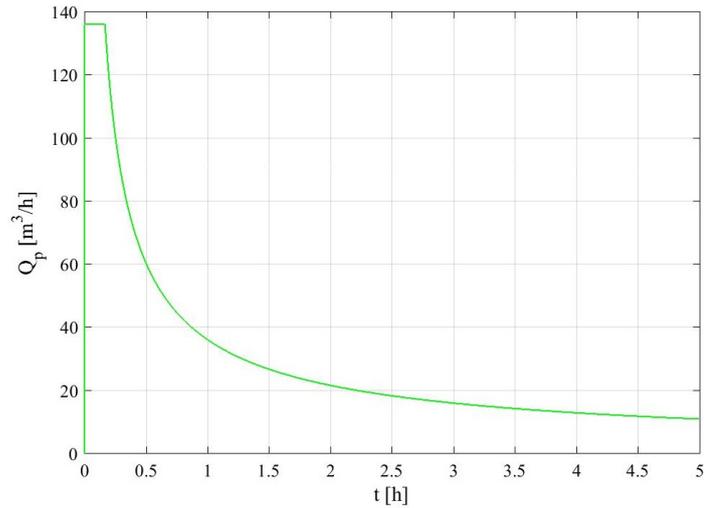


Figura 8.14: Area verde D2: andamento della portata di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

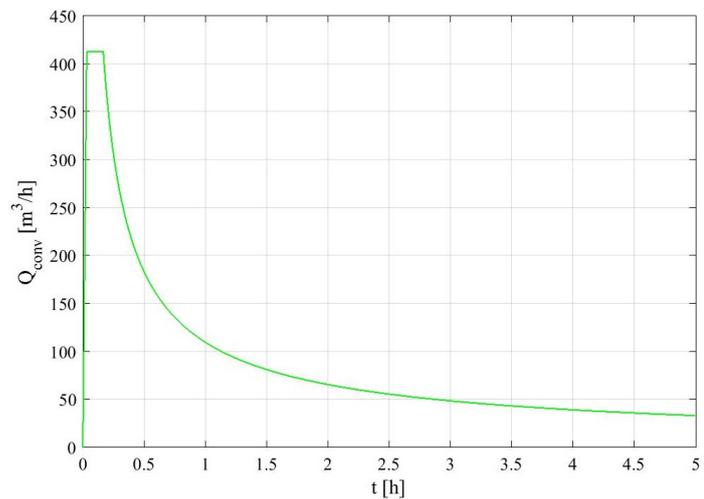


Figura 8.15: Area verde D2: andamento della portata convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

all'area verde D1, ottenendo un andamento della capacità d'infiltrazione coincidente con quello utilizzato per la zona verde A (vedasi paragrafo 5.3.2).

Nell'ambito della presente analisi, è emerso un problema nell'attribuire un valore al grado di saturazione iniziale (s_0), lo stesso già affrontato per l'area verde D1. Si è quindi giunti alla medesima conclusione, ipotizzando un grado di saturazione iniziale pari a 0, di cui è noto il corrispondente tasso d'infiltrazione potenziale (f_0), riportato al paragrafo 8.1.2.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo e la capacità d'infiltrazione, è stato possibile determinare l'andamento della portata in uscita: in Figura 8.18 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). Dall'istante iniziale a 1 *min* circa, la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Superato il periodo iniziale di 1 *min*, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che aumenta progressivamente

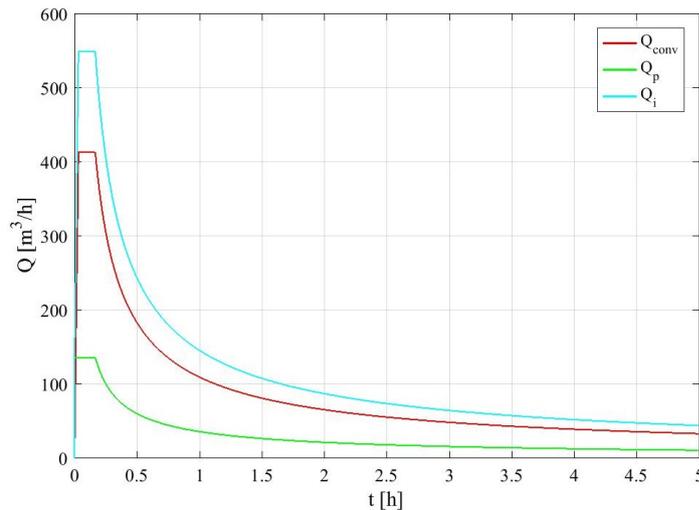


Figura 8.16: Area verde D2: andamento della portata in ingresso Q_i in funzione del tempo, confrontata con la portata convogliata Q_{conv} e la portata di pioggia Q_p (periodo di ritorno = 2 anni)

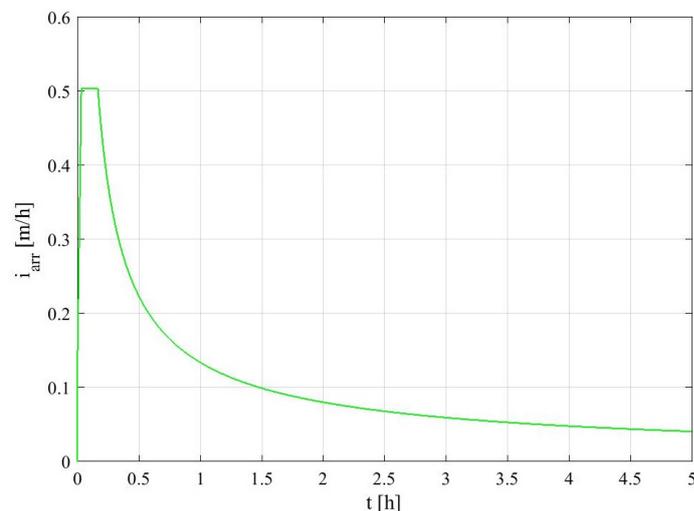


Figura 8.17: Area verde D2: andamento dell'intensità di arrivo in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

nel tempo. Nel momento in cui l'acqua accumulata supera il bordo dello stramazzo, la portata in uscita inizia a crescere. Il parametro raggiunge quindi un massimo di $236.56 \text{ m}^3/h$ e poi decresce in funzione del tempo di precipitazione. Il repentino aumento che si verifica a 2 h e 40 min circa rappresenta il momento in cui l'area verde raggiunge la saturazione: ne consegue che la portata in ingresso va ad alimentare totalmente quella in uscita. Superato questo istantaneo aumento, la portata in uscita torna a decrescere in funzione del tempo, seguendo l'andamento della portata in ingresso.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $2.22 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area

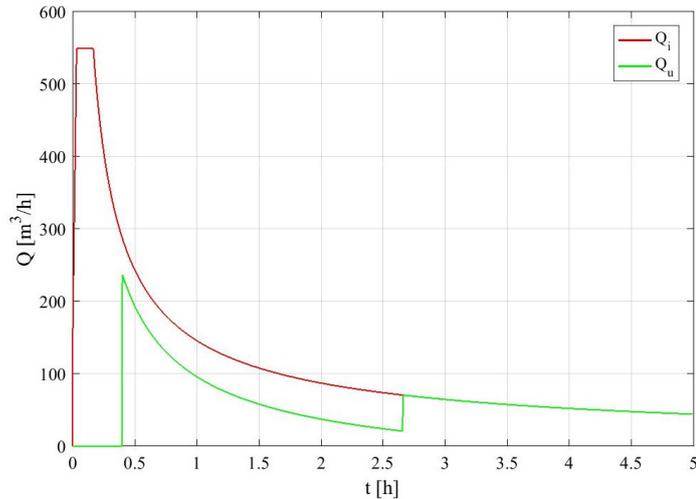


Figura 8.18: Area verde D2: confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

Tabella 8.5: Parametri di prestazione dell'area verde D2 (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
$4.02 \cdot 10^{-1}$	0.43	287.74	2.66

verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}): i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.5. I risultati raggiunti sono stati positivi, mettendo in evidenza il ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata in ingresso. Considerando l'entità della portata stessa, la zona verde riesce sia a bloccarne una quota moderatamente consistente, come evidenziato dal valore del volume trattenuto, sia a ridurre il picco, come evidenziato dal valore del tasso di abbattimento. Anche il valore assunto dal tempo di raggiungimento della saturazione è moderatamente elevato, sottolineando ulteriormente l'importanza del ruolo svolto dall'area verde.

Si è quindi deciso di esaminare la zona verde facendo variare il tempo di ritorno e analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita.

Confronto al variare del tempo di ritorno È stato effettuato un confronto al variare del tempo di ritorno (T): sono stati considerati i valori 2 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 10 anni e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. Il risultato ottenuto viene riportato in Figura 8.19: la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 anni, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 anni e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 anni. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in uscita si instaura progressivamente in anticipo ed assume valori maggiori. Questi due fattori determinano anche un anticipo dell'istante di raggiungimento della condizione di saturazione dell'area verde, rappresentata dal repentino aumento che si verifica durante la fase di decrescita del parametro. Il comportamento appena descritto è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento dell'altezza di pioggia, dell'intensità di pioggia, della portata in ingresso ed infine della portata in uscita.

I risultati ottenuti per tempi di ritorno di 5 e 10 anni sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $3.07 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ e $3.63 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicati trascurabili.

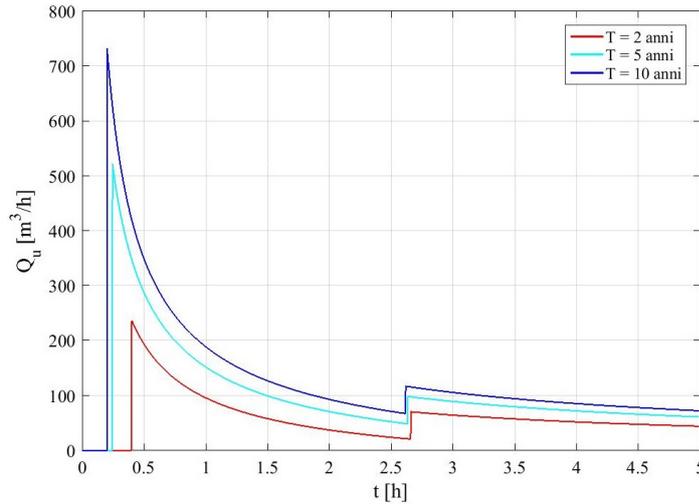


Figura 8.19: Area verde D2: andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a 0.20 h, istante in cui la curva blu si discosta dal valore nullo; la curva rossa e quella azzurra continuano a coincidere fino a 0.25 h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

Tabella 8.6: Parametri di prestazione dell'area verde D2: confronto al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
2	$4.02 \cdot 10^{-1}$	0.43	287.74	2.66
5	$2.45 \cdot 10^{-1}$	0.69	287.74	2.63
10	$2.01 \cdot 10^{-1}$	0.81	287.74	2.62

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del tempo di ritorno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.6. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. L'unico parametro che rimane invariato è il volume trattenuto dall'area verde, su cui il tempo di ritorno non va ad incidere.

8.3.2 Seconda fase di studio

Partendo dai dati presentati ai paragrafi precedenti, è stato implementato sull'area verde D3 il programma elaborato mediante il software *MATLAB*. Si è scelto di analizzare l'area verde su un arco temporale da 0 a 5 h, discretizzato in passi di ampiezza 0.001 h, fissando il tempo di ritorno (T) a 2 anni.

Il primo parametro esaminato è l'intensità di pioggia, calcolata sulla base dell'andamento delle precipitazioni caratteristico dell'area considerata (vedasi equazione (4.6)). Dal momento che i parametri delle curve di probabilità pluviometrica sono gli stessi per tutte le tre aree verdi analizzate, l'andamento dell'intensità di pioggia corrisponde a quanto riportato in Figura 8.6 per la zona verde D1.

Sulla base dei risultati ottenuti per le aree verdi D1 e D2 e dei dati a disposizione è stato quindi

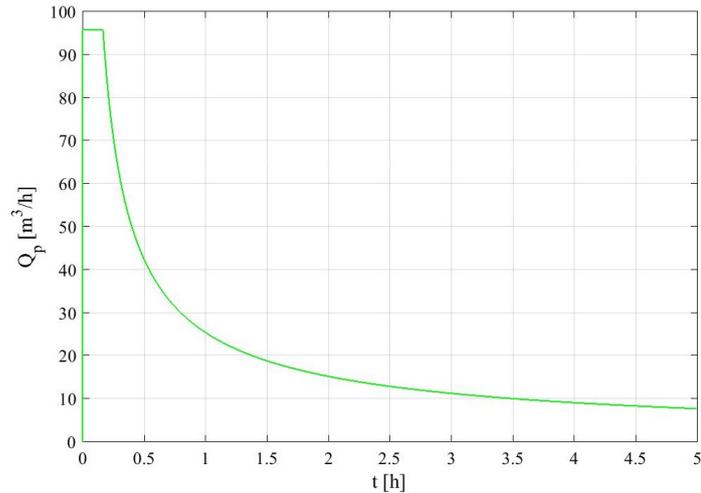


Figura 8.20: Area verde D3: andamento della portata di pioggia in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

possibile analizzare la portata in ingresso, pari alla somma tra la portata di pioggia e la portata convogliata (vedasi equazione (4.5)).

Il primo dei due contributi, calcolato mediante l'equazione (4.7), presenta l'andamento riportato in Figura 8.20: partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino ad un massimo di $95.73 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce all'aumentare del tempo di precipitazione, avvicinandosi asintoticamente al valore nullo.

Il secondo dei due contributi è stato calcolato come somma tra la portata in uscita dall'area verde D1 e la portata in uscita dall'area verde D2. Il risultato ottenuto presenta l'andamento riportato in Figura 8.21: partendo da 0, il parametro cresce fino ad un massimo di $236.56 \text{ m}^3/\text{h}$, raggiunto il quale subisce una fase di decrescita caratterizzata dal verificarsi di repentini aumenti. Superato l'ultimo repentino aumento (a $114.57 \text{ m}^3/\text{h}$), il parametro decresce e si avvicina asintoticamente al valore nullo.

Si è quindi potuto analizzare l'andamento della portata in ingresso (vedasi Figura 8.22): partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino a $95.73 \text{ m}^3/\text{h}$, si mantiene costante e poi decresce. La fase di decrescita è caratterizzata dal verificarsi di repentini aumenti: il primo di essi porta

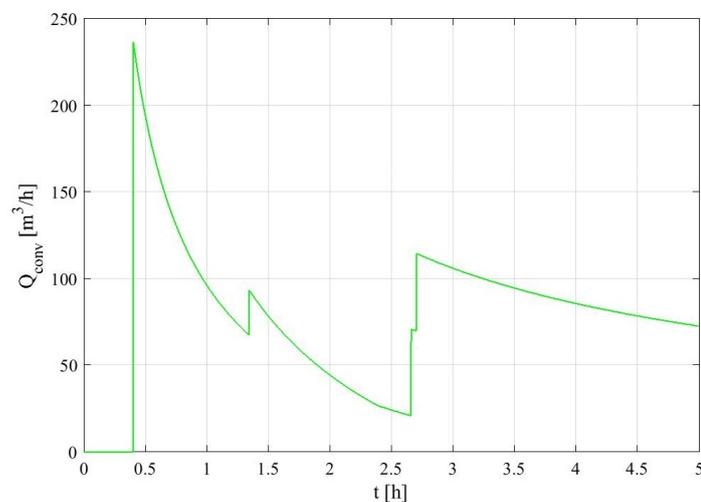


Figura 8.21: Area verde D3: andamento della portata convogliata in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

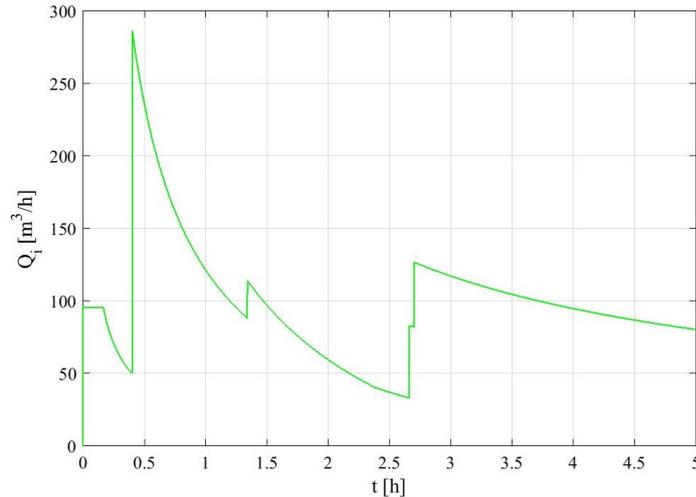


Figura 8.22: Area verde D3: andamento della portata in ingresso in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

il parametro a raggiungere un picco di $286.43 \text{ m}^3/\text{h}$. Superato l'ultimo repentino aumento (a $126.76 \text{ m}^3/\text{h}$), il parametro decresce e si avvicina asintoticamente al valore nullo.

Valutata la portata in ingresso, si è passati a valutare l'intensità di arrivo sulla base dell'equazione (4.9): l'andamento ottenuto è riportato in Figura 8.23. Partendo da 0, il parametro cresce repentinamente fino a $1.25 \cdot 10^{-1} \text{ m/h}$, si mantiene costante e poi decresce. La fase di decrescita è caratterizzata dal verificarsi di repentini aumenti: il primo di essi porta il parametro a raggiungere un picco di $3.74 \cdot 10^{-1} \text{ m/h}$. Superato l'ultimo repentino aumento (a $1.65 \cdot 10^{-1} \text{ m/h}$), il parametro decresce e si avvicina asintoticamente al valore nullo.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo, è stato necessario esaminare l'andamento della capacità d'infiltrazione, per poterle confrontare e definire il comportamento dell'area verde nel ricevere la portata in ingresso. In questo frangente è stato effettuato lo stesso ragionamento applicato all'area verde D1, ottenendo un andamento della capacità d'infiltrazione coincidente con quello utilizzato per la zona verde A (vedasi paragrafo 5.3.2).

Nell'ambito della presente analisi, è emerso un problema nell'attribuire un valore al grado di saturazione iniziale (s_0), lo stesso già affrontato per l'area verde D1. Si è quindi giunti alla

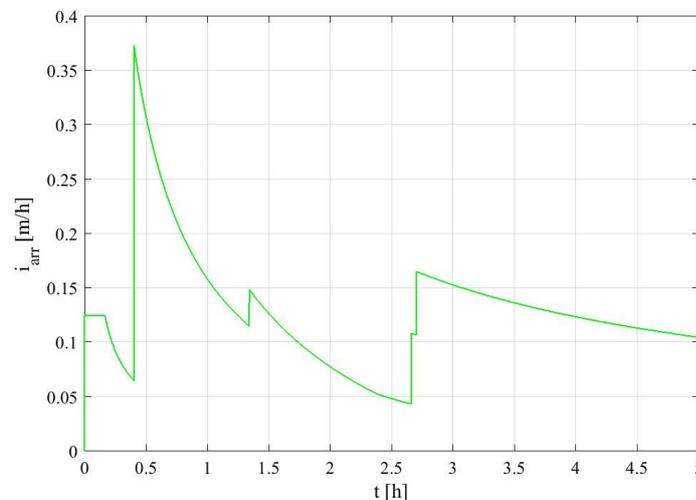


Figura 8.23: Area verde D3: andamento dell'intensità di arrivo in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni)

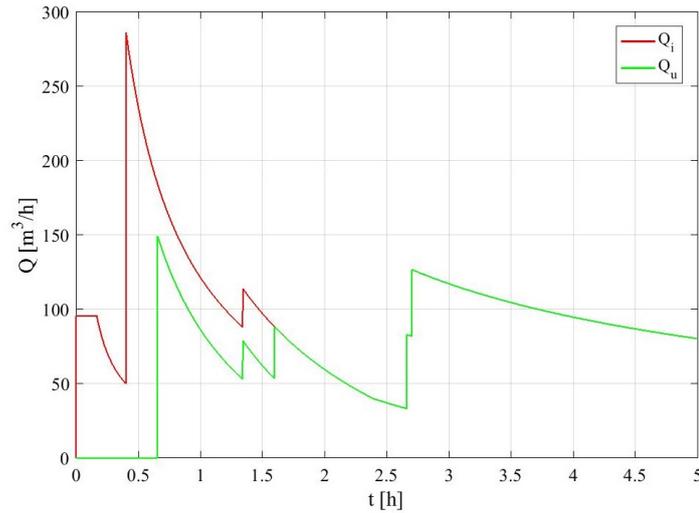


Figura 8.24: Area verde D3: confronto fra la portata in ingresso Q_i e la portata in uscita Q_u in funzione del tempo (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

medesima conclusione, ipotizzando un grado di saturazione iniziale pari a 0, di cui è noto il corrispondente tasso d'infiltrazione potenziale (f_0), riportato al paragrafo 8.1.3. Infine è stato ipotizzato uno spessore (S) della zona verde pari a 0.2 m.

Dopo aver analizzato l'intensità di arrivo e la capacità d'infiltrazione, è stato possibile determinare l'andamento della portata in uscita: in Figura 8.24 viene riportato il risultato ottenuto (curva verde), confrontato con la portata in ingresso (curva rossa). Dall'istante iniziale a 3.5 min circa, la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, saturandola progressivamente. In questo intervallo iniziale non si verifica alcun accumulo di acqua piovana sulla superficie e la portata in uscita si mantiene pari al valore nullo.

Superato il periodo iniziale di 3.5 min, la capacità d'infiltrazione diventa inferiore all'intensità di arrivo: il volume in ingresso va in parte ad infiltrarsi all'interno del mezzo e in parte ad accumularsi sulla superficie verde, formando uno strato di acqua piovana che aumenta progressivamente nel tempo. Nel momento in cui l'acqua accumulata supera il bordo dello stramazzo, la portata in uscita inizia a crescere. Il parametro raggiunge quindi un picco di $149.64 \text{ m}^3/\text{h}$ e poi decresce in funzione del tempo di precipitazione. La fase di decrescita è caratterizzata dal verificarsi di repentini aumenti: il più significativo si realizza a 1 h e 36 min circa, nel momento in cui l'area verde raggiunge la saturazione. Ne consegue che la portata in ingresso va ad alimentare totalmente quella in uscita: superato questo istantaneo aumento, la portata in uscita segue l'andamento della portata in ingresso.

Il risultato ottenuto è stato validato effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $1.26 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso, è stato possibile valutare la prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}): i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.7. I risultati raggiunti sono stati positivi, mettendo in evidenza il ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata in ingresso. Considerando l'entità della portata stessa, la zona verde riesce sia a bloccare una quota moderatamente consistente, come evidenziato dal valore del volume trattenuto, sia a ridurre il picco, come evidenziato dal valore del tasso di abbattimento.

Tabella 8.7: Parametri di prestazione dell'area verde D3 (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	122.69	1.60

Anche il valore assunto dal tempo di raggiungimento della saturazione è moderatamente elevato, sottolineando ulteriormente l'importanza del ruolo svolto dall'area verde.

Si è quindi deciso di esaminare la zona verde facendo variare i dati di input: in primo luogo si è agito sul tempo di ritorno, esaminando l'influenza di questo cambiamento sulla portata in uscita e, di conseguenza, sui parametri di prestazione dell'area verde. In secondo luogo si è scelto di far variare lo spessore e la tipologia terreno e si è ipotizzato l'inserimento di materiale alveolare, con l'obiettivo di individuare la configurazione migliore per ridurre la portata in ingresso.

8.3.2.1 Confronto al variare del tempo di ritorno

Il primo confronto è stato effettuato facendo variare il tempo di ritorno (T): sono stati considerati i valori 2 (corrispondente al caso iniziale), 5 e 10 *anni* e si è analizzato il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. Il risultato ottenuto viene riportato in Figura 8.25: la curva rossa corrisponde ad un tempo di ritorno di 2 *anni*, la curva azzurra ad un tempo di ritorno di 5 *anni* e la curva blu ad un tempo di ritorno di 10 *anni*. Confrontando le tre curve si può constatare che, passando dalla curva rossa a quella blu, la portata in uscita si instaura progressivamente in anticipo ed assume valori maggiori: questi due fattori determinano anche un anticipo dell'istante di raggiungimento della condizione di saturazione dell'area verde. Il comportamento appena descritto è dovuto al fatto che l'aumento del tempo di ritorno determina un aumento dell'altezza di pioggia, dell'intensità di pioggia, della portata in ingresso ed infine della portata in uscita.

I risultati ottenuti per tempi di ritorno di 5 e 10 *anni* sono stati validati effettuando un bilancio di volumi: è stato quindi verificato che il volume in ingresso coincide con la somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita dall'area verde. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $1.74 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ e $2.06 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$,

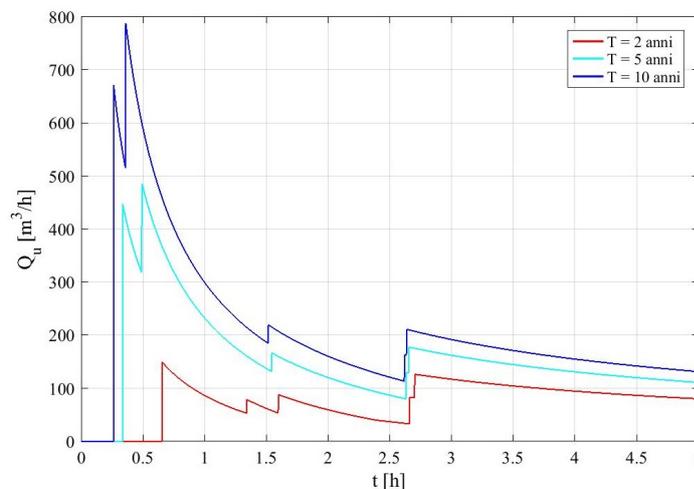


Figura 8.25: Area verde D3: andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m). Si può notare che le tre curve coincidono dall'istante 0 fino a 0.26 h, istante in cui la curva blu si discosta dal valore nullo; la curva rossa e quella azzurra continuano a coincidere fino a 0.34 h, istante in cui la curva azzurra si discosta dal valore nullo

Tabella 8.8: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare del periodo di ritorno T (grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	122.69	1.60
5	$3.36 \cdot 10^{-1}$	0.78	122.69	1.55
10	$2.62 \cdot 10^{-1}$	0.91	122.69	1.52

giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei tre casi analizzati, è possibile valutare l'influenza del tempo di ritorno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.8. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione. L'unico parametro che rimane invariato è il volume trattenuto dall'area verde, su cui il tempo di ritorno non va ad incidere.

8.3.2.2 Confronto al variare dello spessore

Il secondo confronto è stato effettuato facendo variare lo spessore dell'area verde (S) ed esaminando il modo in cui questo cambiamento influisce sulla portata in uscita. Sono stati considerati valori di spessore pari a 0.2 (corrispondente al caso iniziale) e 0.5 m. È stato inoltre analizzato il caso in cui l'area verde non presenti un limite inferiore e non possa giungere alla saturazione: il drenaggio dell'acqua di pioggia continua perciò durante l'intero evento di precipitazione.

Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 18 h.

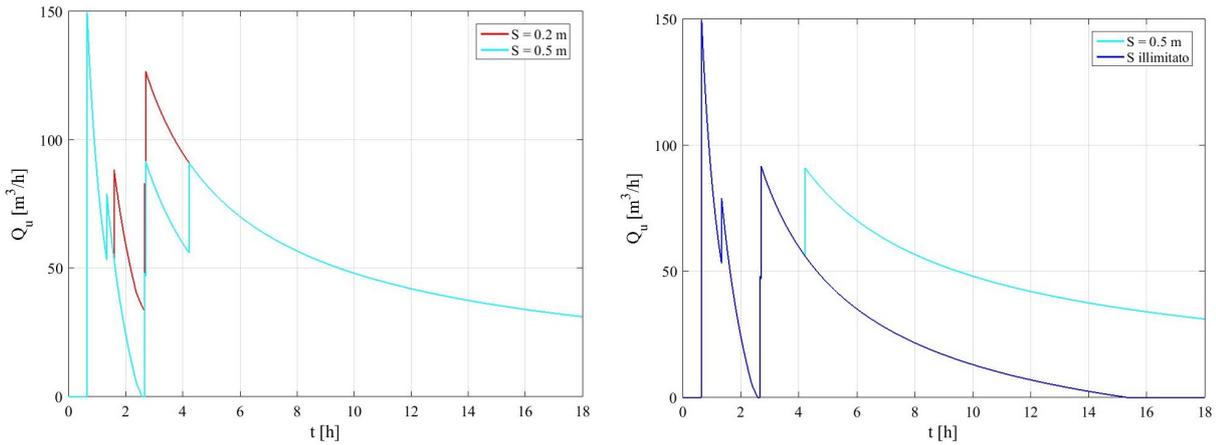
Per maggiore chiarezza, si è deciso di riportare in Figura 8.26(a) il confronto tra il caso in cui lo spessore sia pari a 0.2 m (curva rossa) e quello in cui lo spessore sia pari a 0.5 m (curva azzurra); in Figura 8.26(b) è stato invece riportato il confronto tra il caso in cui lo spessore sia pari a 0.5 m (curva azzurra) e quello in cui lo spessore sia illimitato (curva blu).

Mettendo a confronto la curva azzurra con quella rossa è emerso che, all'aumentare dello spessore dell'area verde, si verifica un ritardo dell'istante in cui l'area verde giunge alla condizione di saturazione. Infatti per la curva rossa l'area verde raggiunge la saturazione a 1 h e 36 min circa, mentre per la curva azzurra ciò avviene a 4 h e 13 min circa.

Mettendo poi a confronto la curva blu con quella rossa è emerso che la mancanza di un limite inferiore determina l'impossibilità per l'area verde di raggiungere la condizione di saturazione. In particolare per la curva blu, all'istante di 15 h e 22 min circa, la capacità d'infiltrazione torna ad essere superiore all'intensità di arrivo: tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde e la portata in uscita si annulla.

I risultati ottenuti per uno spessore di 0.5 m e per uno illimitato sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, sono stati rilevati errori rispettivamente di $1.26 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ e $1.75 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicati trascurabili.

Confrontando la curva relativa alla portata in uscita con quella relativa alla portata in ingresso nei tre casi analizzati, è stato possibile valutare l'influenza dello spessore sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri di prestazione dell'area verde (vedasi



(a) Primo confronto. Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a 1.60 h, istante in cui la curva rossa subisce un repentino aumento; la curva rossa e quella azzurra tornano a coincidere a 4.22 h, istante in cui la curva azzurra subisce un repentino aumento

(b) Secondo confronto. Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a 4.22 h, istante in cui la curva azzurra subisce un repentino aumento

Figura 8.26: Area verde D3: andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare dello spessore S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

paragrafo 4.3.4), corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.9. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto sia del tempo di raggiungimento della saturazione, mentre il tempo in cui si instaura la portata in uscita e il tasso di abbattimento rimangono invariati.

Dal confronto fra i tre casi analizzati, le configurazioni migliori risultano essere quelle in cui lo spessore dell'area verde è rispettivamente pari a 0.5 m e illimitato. In particolare il secondo schema appare il più efficace, poiché non vi è la presenza di uno strato inferiore che limiti il volume stoccabile dal mezzo e il processo di infiltrazione continua per tutta la durata della precipitazione.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare le due configurazioni proposte facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.10. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 8.3.2.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita e un aumento del tasso di abbattimento. Inoltre nel caso di uno spessore pari a 0.5 m, si verifica anche una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Tabella 8.9: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare dello spessore S (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
0.2	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	122.69	1.60
0.5	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	214.70	4.22
illim	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	illim	n.d.

Tabella 8.10: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare del periodo di ritorno T e dello spessore S (grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di instaurazione della portata in uscita o di raggiungimento della saturazione "non definito"

T [anni]	t_u [h]		η [-]		V_t [m ³]		t_{sat} [h]	
	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim	$S=0.5$ m	S illim
2	$6.55 \cdot 10^{-1}$		0.52		214.70	illim	4.22	n.d.
5	$3.36 \cdot 10^{-1}$		0.78		214.70	illim	4.17	n.d.
10	$2.62 \cdot 10^{-1}$		0.91		214.70	illim	4.14	n.d.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, le due soluzioni proposte risultano comunque valide, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato. In particolare la configurazione che presenta uno spessore illimitato viene confermata come la migliore, poichè l'area verde non presenta limiti di volume trattenuto e non raggiunge la condizione di saturazione, anche in caso di aumento del tempo di ritorno. In questo frangente risulta necessario sottolineare che potrebbe non essere consentita la presenza di uno spessore illimitato, ad esempio nel caso in cui l'area sia soggetta a problemi di inquinamento e risulti opportuno inserire uno strato che la limiti inferiormente.

8.3.2.3 Confronto al variare della tipologia di terreno

Il terzo confronto è stato effettuato facendo variare la tipologia di terreno: si è quindi ipotizzato di sostituire la sabbia con la ghiaia (vedasi paragrafo 3.3.2), analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita.

Sulla base dello studio effettuato sull'area verde A (vedasi paragrafo 5.3.2.5), si è deciso di assegnare alla porosità il valore 0.45 [3] ed eguagliare la capacità d'infiltrazione alla conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}), fissandone il valore a 10^{-4} m/s [7].

È stato effettuato un confronto fra il caso in cui è presente terreno sabbioso e quello in cui è presente terreno ghiaioso ed il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 8.27: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno ghia-

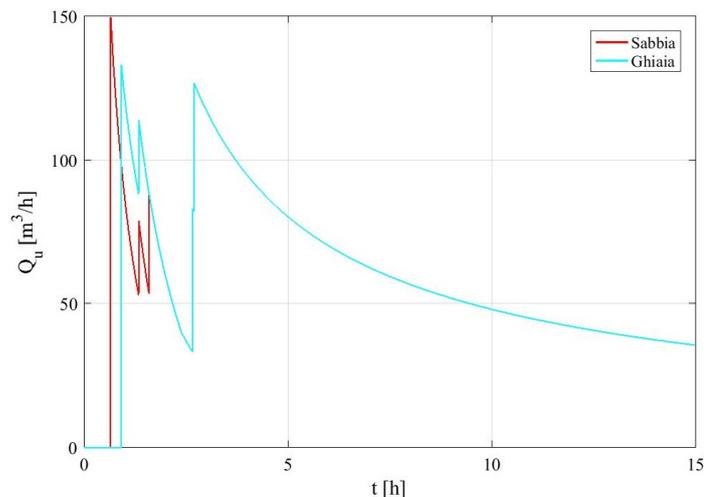


Figura 8.27: Area verde D3: andamento della curva della portata in uscita Q_u al variare della tipologia di terreno (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m). Si può notare che le due curve coincidono fino a $6.55 \cdot 10^{-1}$ h, istante in cui la curva rossa si discosta dal valore nullo. Le due curve tornano a coincidere a 1.60 h

ioso. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla tipologia di terreno. In questo frangente è necessario esaminare il comportamento di un terreno ghiaioso, dal momento che quello di un terreno sabbioso è stato analizzato in precedenza.

Considerando quindi la curva azzurra, la capacità d'infiltrazione si mantiene superiore all'intensità di arrivo per tutto il tempo dell'analisi, ad eccezione di un brevissimo arco temporale da 24 a 25 min, che risulta ininfluente. Tutto il volume in ingresso va ad infiltrarsi all'interno dell'area verde, che raggiunge la condizione di saturazione. Da questo momento in poi, il volume in ingresso inizia ad accumularsi sulla superficie verde, fino a raggiungere il bordo dello stramazzo e a determinare l'instaurarsi di una portata in uscita.

Ad eccezione del primo minuto di analisi, la capacità d'infiltrazione relativa alla curva azzurra risulta sempre superiore a quella relativa alla curva rossa: ne consegue che per la curva azzurra l'area verde raggiunge la condizione di saturazione in anticipo rispetto a quanto avviene per la curva rossa.

Dall'altra parte però, in base alle dinamiche precedentemente descritte, la portata in uscita si instaura prima per la curva rossa e poi per la curva azzurra: di conseguenza, il picco raggiunto dalla curva azzurra risulta minore rispetto a quello raggiunto dalla curva rossa.

Il risultato ottenuto sostituendo il terreno sabbioso con un terreno ghiaioso è stato validato dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $1.26 \cdot 10^{-2} m^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della tipologia di terreno sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.11. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che la sostituzione del terreno sabbioso con uno ghiaioso determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde. Contemporaneamente si verifica una diminuzione del tasso di abbattimento, mentre il tempo di raggiungimento della saturazione diminuisce.

Dal confronto fra i due casi analizzati, la configurazione migliore risulta quella in cui è presente terreno ghiaioso.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare lo spessore dell'area verde da 0.2 m a 0.5 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.12. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 8.3.2.2). Infatti si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde, sia del tempo di raggiungimento della saturazione e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m.

Tabella 8.11: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare della tipologia di terreno (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m)

Materiale	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
Sabbia	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	122.69	1.60
Ghiaia	$9.15 \cdot 10^{-1}$	0.47	130.35	0.55

Tabella 8.12: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare dello spessore S (terreno ghiaioso, tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$9.15 \cdot 10^{-1}$	0.47	130.35	0.55
0.5	2.04	0.44	233.87	1.30

Tabella 8.13: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare del periodo di ritorno T (terreno ghiaioso, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m)

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	2.04	0.44	233.87	1.30
5	$5.66 \cdot 10^{-1}$	0.56	233.87	$7.58 \cdot 10^{-1}$
10	$3.49 \cdot 10^{-1}$	0.63	233.87	$7.13 \cdot 10^{-1}$

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 *anni*. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.13. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 8.3.2.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

8.3.2.4 Confronto in presenza di materiale alveolare

Il quarto confronto è stato effettuato ipotizzando di inserire uno strato di materiale alveolare (avente una porosità pari a 0.9 [7]) al di sotto di uno strato di terreno sabbioso (vedasi paragrafo 3.3.3) ed analizzando il modo in cui questo cambiamento influisce sull'andamento della portata in uscita. In questo frangente è ancora il terreno sabbioso a determinare il processo di infiltrazione: la presenza del materiale alveolare influenza solo il valore del massimo volume stoccabile, causandone un aumento.

È stato effettuato un confronto fra il caso in cui vi siano 0.2 m di terreno sabbioso rispetto a quello in cui vi siano 0.15 m di terreno sabbioso (valore minimo affinché possa essere mantenuto un tappeto erboso) sovrastanti 0.05 m di materiale alveolare. Allo scopo di effettuare le analisi, è stato necessario ampliare l'arco temporale, portandolo a 15 h.

Il risultato ottenuto per la portata in uscita viene riportato in Figura 8.28: la curva rossa corrisponde ad terreno sabbioso mentre la curva azzurra ad un terreno sabbioso sovrastante del materiale alveolare. Dal confronto tra la curva azzurra e quella rossa è emerso che l'andamento della portata in uscita è influenzato dalla presenza del materiale alveolare, che determina un aumento del massimo volume stoccabile: ne consegue un ritardo dell'istante in cui l'area verde giunge alla condizione di saturazione. Infatti per la curva rossa l'area verde raggiunge la saturazione a 1 h e 36 min circa, mentre per la curva azzurra ciò avviene a 2 h e 9 min circa.

I risultati ottenuti in presenza del materiale alveolare sono stati validati dalla verifica effettuata sul bilancio dei volumi: il volume in ingresso corrisponde in ogni istante alla somma del volume infiltrato, del volume accumulato e del volume in uscita. Considerando i valori finali dei volumi, è stato rilevato un errore di $1.26 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$, giudicato trascurabile.

Confrontando la curva relativa alla portata in ingresso con quella relativa alla portata in uscita

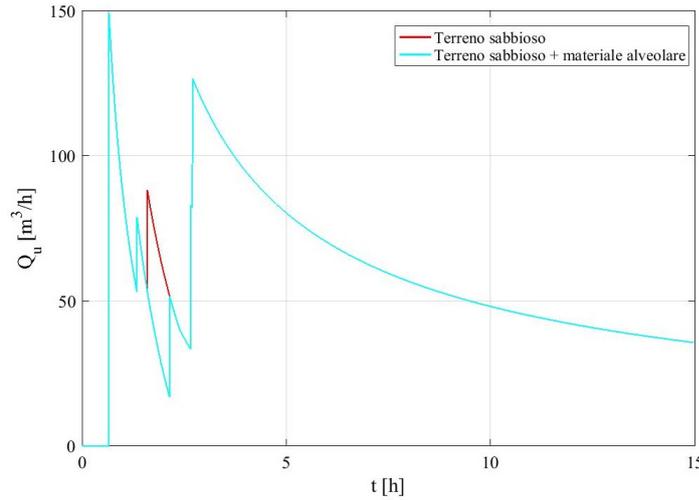


Figura 8.28: Area verde D3: andamento della curva della portata in uscita in presenza di materiale alveolare (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore pari a 0.2 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m. Si può notare che le due curve coincidono dall'istante 0 fino a 1.60 h, istante in cui la curva rossa subisce un repentino aumento. Le due curve tornano a coincidere a 2.15 h

nei due casi analizzati, è possibile valutare l'influenza della presenza del materiale sulla prestazione offerta dalla zona verde. Sono stati quindi calcolati i parametri introdotti al paragrafo 4.3.4, corrispondenti al tempo in cui si instaura la portata in uscita (t_u), al tasso di abbattimento (η), al volume trattenuto dall'area verde (V_t) e al tempo di raggiungimento della saturazione (t_{sat}). I valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.14. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aggiunta di materiale alveolare determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde. Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde sia del tempo di raggiungimento della saturazione. Il tempo in cui si instaura la portata in uscita e il tasso di abbattimento rimangono invece invariati.

Dal confronto fra i due casi analizzati, la configurazione migliore risulta quella in cui è presente uno strato di materiale alveolare.

Allo scopo di aumentarne l'efficacia, si è scelto di analizzare la soluzione proposta facendo variare lo spessore dell'area verde, da 0.2 m a 0.5 m. Si è mantenuto pari a 0.15 m lo spessore dello strato di sabbia, mentre si è fatto variare lo spessore del sottostante strato di materiale alveolare da 0.05 a 0.35 m. Sono stati dunque calcolati i parametri di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.15. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 8.3.2.2). Infatti si verifica un aumento sia del volume trattenuto dall'area verde sia del tempo di raggiungimento della saturazione. In questo ambito la configurazione ideale risulta quella in cui lo spessore è pari a 0.5 m.

Allo scopo di verificarne la validità, si è scelto di analizzare la configurazione proposta facendo variare il tempo di ritorno (T) da 2 a 10 anni. Sono stati dunque calcolati i parametri

Tabella 8.14: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto in presenza di materiale alveolare (tempo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.2 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.05 m

Materiale alveolare	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
No	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	122.69	1.60
Sì	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	141.86	2.15

Tabella 8.15: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare dello spessore S (presenza di materiale alveolare, periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso resta fisso a 0.15 m, mentre viene fatto variare lo spessore del materiale alveolare da 0.05 m a 0.35 m

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.2	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	141.86	2.15
0.5	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	348.89	8.05

Tabella 8.16: Parametri di prestazione dell'area verde D3: confronto al variare del periodo di ritorno T (terreno ghiaioso, grado di saturazione iniziale = 0, spessore = 0.5 m). Lo spessore dello strato di terreno sabbioso è pari a 0.15 m, mentre quello del materiale alveolare è pari a 0.35 m

T [anni]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	348.89	8.05
5	$3.36 \cdot 10^{-1}$	0.78	348.89	8.00
10	$2.62 \cdot 10^{-1}$	0.91	348.89	7.97

di prestazione dell'area verde ed i valori ottenuti sono riportati in Tabella 8.16. Effettuando un paragone tra i risultati, si può constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un moderato peggioramento delle prestazioni dell'area verde (vedasi paragrafo 8.3.2.1). Infatti si verifica una diminuzione del tempo in cui si instaura la portata in uscita, un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione del tempo in cui si raggiunge la condizione di saturazione dell'area verde.

Nonostante si verifichino dei cambiamenti in negativo, la soluzione proposta risulta comunque valida, soprattutto grazie all'elevato valore del volume trattenuto dall'area verde, che rimane invariato.

8.4 Analisi del processo di scarico dell'acqua piovana accumulata

Riprendendo quanto indicato al paragrafo 8.1, si è scelto di mantenere un dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone pari a 13 cm per le aree verdi D1 e D2 e pari a 8 cm per l'area verde D3. Per ciascuna delle zone verdi considerate, si è ipotizzato di inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato: in questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie verde. Sono state quindi ipotizzate due possibili collocazioni dello scarico: all'estremità superiore e all'estremità inferiore dell'area verde. Per entrambi i casi scelti, è stato individuato il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) e la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), in base alla quale è stata applicata l'equazione (4.27) ed è stato stimato il diametro (ϕ_{luce}).

Bocca di scarico collocata all'estremità superiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità superiore dell'area verde, è necessario far riferimento alla legge di efflusso da una luce a battente (vedasi paragrafo 4.4.1).

Si è quindi ipotizzato che il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}) sia pari a 2 h e si è applicata l'equazione (4.31) per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}). Considerando i valori di dislivello tra terreno e bordo dello stramazzone indicati in precedenza, sono stati conseguiti i risultati riportati in Tabella 8.17. Sulla base di questi ultimi, è stato possibile quantificare il diametro della bocca di scarico (ϕ_{luce}) per ciascuna area verde. Ne consegue che le

Tabella 8.17: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità superiore dell'area verde

Parametro	Area verde		
	D1	D2	D3
$\Omega_{luce} [m]$	$3.97 \cdot 10^{-2}$	$4.04 \cdot 10^{-2}$	$2.23 \cdot 10^{-2}$
$\phi_{luce} [cm]$	22.48	22.68	16.85

Tabella 8.18: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità inferiore dell'area verde

Parametro	Area verde	
	D1	D2
$\Omega_{luce} [m]$	$3.62 \cdot 10^{-2}$	$3.69 \cdot 10^{-2}$
$\phi_{luce} [cm]$	21.48	21.67

aree verdi D1 e D2 richiedono un diametro di 23 *cm*, mentre l'area verde D3 richiede un diametro di 17 *cm*.

Bocca di scarico collocata all'estremità inferiore dell'area verde Nel caso in cui la bocca di scarico sia collocata all'estremità inferiore dell'area verde, è necessario tenere in considerazione non soltanto il processo di efflusso attraverso di essa ma anche il processo di infiltrazione all'interno del terreno (vedasi paragrafo 4.4.2).

Risulta quindi indispensabile far riferimento sia alla legge di efflusso da una luce a battente, sia alla legge di Darcy. Si è calcolato in primo luogo il tempo necessario per smaltire la lama d'acqua piovana (t_{svuot}), utilizzando la legge di Darcy (vedasi equazione 4.35) ed eguagliando la conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}) al parametro f_c del modello Horton. Il valore ottenuto è stato quindi a sua volta adoperato per quantificare la sezione della bocca di scarico (Ω_{luce}), utilizzando la legge di efflusso da una luce a battente.

Per quanto concerne le aree verdi D1 e D2, sono stati considerati i valori di dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo (p) indicati in precedenza ed è stato preso in esame il processo di infiltrazione all'interno dello strato di terreno sabbioso: sono stati quindi conseguiti i risultati riportati in Tabella 8.18.

Per quanto concerne invece l'area verde D3, è stato considerato il valore di dislivello (p) indicato in precedenza, facendo variare lo spessore (S) da 0.2 a 0.5 *m*: i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 8.19.

Sulla base dei risultati ottenuti, è stato possibile quantificare il diametro della bocca di scarico (ϕ_{luce}) per ciascuna area verde. Ne consegue che le aree verdi D1 e D2 richiedono un diametro di 22 *cm*, mentre l'area verde D3 richiede un diametro di 20 *cm* per uno spessore di 0.2 *m* e un diametro di 19 *cm* per uno spessore di 0.5 *m*.

Tabella 8.19: Parametri della bocca di scarico, collocata all'estremità inferiore dell'area verde D3. Si è fatto variare lo spessore dell'area verde (S)

Parametro	$S=0.2 m$	$S=0.5 m$
$t_{svuot} [h]$	1.47	1.62
$\Omega_{luce} [m]$	$3.03 \cdot 10^{-2}$	$2.75 \cdot 10^{-2}$
$\phi_{luce} [cm]$	19.64	18.70

8.5 Conclusioni

Dopo aver analizzato in modo approfondito le aree verdi D1, D2 e D3, è stato possibile trarre delle conclusioni in relazione alla prestazione offerta dalle zone esaminate nel ridurre la portata in ingresso.

Innanzitutto ci si è focalizzati sulle aree verdi D1 e D2, che effettuano una prima azione di abbattimento sul carico di acqua piovana. I risultati ottenuti in relazione ai parametri di prestazione, riportati in Tabella 8.20, evidenziano l'efficacia delle zone verdi nell'abbattere il rispettivo carico di acqua di pioggia in ingresso.

Le aree verdi D1 e D2 sono inoltre state studiate facendo variare il tempo di ritorno, rilevando un peggioramento della prestazione da loro offerta. Si verifica infatti un aumento del tasso di abbattimento e una diminuzione sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del tempo di raggiungimento della saturazione.

In secondo luogo l'attenzione si è concentrata sull'area verde D3, che effettua una seconda azione di abbattimento sul carico di acqua piovana, ricevuto dalle aree verdi D1 e D2. In questo frangente sono state effettuate delle prove facendo variare una parte dei dati di input del programma, con l'obiettivo di esaminarne gli effetti sull'andamento della portata in uscita e, di conseguenza, sulle prestazioni dell'area verde considerata.

Si è potuto constatare che l'aumento del tempo di ritorno determina un peggioramento della prestazione offerta dall'area verde, analogamente a quanto riscontrato per le aree verdi D1 e D2. Si è inoltre potuto constatare che l'aumento dello spessore determina un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. Si verifica infatti un aumento sia del volume trattenuto, sia del tempo di raggiungimento della saturazione.

Infine si è osservato che anche la variazione della tipologia di terreno e l'inserimento di materiale alveolare determinano un miglioramento della prestazione offerta dall'area verde. Nel caso in cui si sostituisca il terreno sabbioso con uno ghiaioso, si verifica un aumento sia del tempo in cui si instaura la portata in uscita, sia del volume trattenuto dall'area verde e, contemporaneamente, una diminuzione del tasso di abbattimento. Invece nel caso in cui si inserisca del materiale alveolare, si verifica un aumento del volume trattenuto e del tempo di raggiungimento della saturazione.

Dopo aver effettuato diverse prove al variare dei dati di input, sono state individuate le configurazioni migliori dell'area verde D3 per raggiungere l'obiettivo di ridurre in modo significativo la portata in ingresso.

La prima configurazione proposta presenta uno spessore illimitato, che consente all'area verde di assorbire l'acqua di pioggia per tutta la durata dell'evento, senza raggiungere la condizione di saturazione. Questa soluzione però non è sempre realizzabile, per le problematiche espresse al paragrafo 8.3.2.2: in questo frangente si può considerare ottimale una configurazione che presenti uno spessore pari a 0.5 m .

In Tabella 8.21 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, per uno spessore sia pari a 0.5 m sia illimitato.

La seconda configurazione proposta prevede di sostituire il terreno sabbioso con il terreno ghiaioso, di spessore pari a 0.5 m : questa soluzione consente sia di abbattere il picco, sia di trattenere una quota significativa della portata in ingresso.

In Tabella 8.22 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area

Tabella 8.20: Parametri di prestazione delle aree verdi D1 e D2 (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

Area verde	t_u [h]	η [-]	V_t [m^3]	t_{sat} [h]
D1	1.34	0.13	282.77	2.69
D2	$4.02 \cdot 10^{-1}$	0.43	287.74	2.66

Tabella 8.21: Parametri di prestazione dell'area verde D3: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno spessore di 0.5 m oppure, dove possibile, illimitato (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0). Il simbolo "illim" indica un volume trattenuto potenzialmente illimitato e il simbolo "n.d." indica un tempo di raggiungimento della saturazione "non definito"

S [m]	t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
0.5	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	214.70	4.22
illim	$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	illim	n.d.

Tabella 8.22: Parametri di prestazione dell'area verde D3: si propone una configurazione in cui sia presente un terreno ghiaioso spesso 0.5 m (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
2.04	0.44	233.87	1.30

Tabella 8.23: Parametri di prestazione dell'area verde D3: si propone una configurazione in cui l'area verde presenti uno strato di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m (periodo di ritorno = 2 anni, grado di saturazione iniziale = 0)

t_u [h]	η [-]	V_t [m ³]	t_{sat} [h]
$6.55 \cdot 10^{-1}$	0.52	348.89	8.05

verde, in presenza di terreno ghiaioso spesso 0.5 m.

La terza configurazione proposta prevede di inserire uno strato di materiale alveolare di spessore pari a 0.35 m al di sotto di uno strato di terreno sabbioso di spessore pari a 0.15 m: questa soluzione consente all'area verde di trattenere una quota significativa della portata in ingresso, raggiungendo la condizione di saturazione dopo un tempo notevolmente lungo.

In Tabella 8.23 viene riportata una sintesi dei valori assunti dai parametri di prestazione dell'area verde, in presenza di materiale alveolare spesso 0.35 m, sottostante uno strato di terreno sabbioso spesso 0.15 m.

Le configurazioni proposte nell'ambito del presente capitolo sottolineano quindi l'importanza del ruolo svolto dall'area verde nel ridurre la portata che, in sua assenza, entrerebbe direttamente all'interno della rete fognaria bianca.

Capitolo 9

Conclusioni

Sulla base dei risultati ottenuti dalle analisi effettuate sulle diverse aree verdi, è possibile trarre le conclusioni del lavoro compiuto.

L'obiettivo del presente elaborato di tesi consiste nell'applicare la filosofia del drenaggio urbano sostenibile all'area del Politecnico di Torino: dal momento che quanto proposto rappresenta un primo approccio alla tematica nell'ambito dell'università, si è scelto di agire sulle zone verdi già presenti, rendendole soggetti attivi nella gestione delle acque di pioggia. Si è quindi promosso un cambiamento di concezione delle aree verdi, andando oltre la loro visione puramente estetica ed attribuendogli un ruolo fondamentale nell'ambito del drenaggio urbano.

A livello pratico, si è quindi ipotizzato di convogliare una quota delle acque meteoriche che cadono sulla superficie dell'università verso alcune zone verdi precedentemente selezionate: favorendo il processo d'infiltrazione dell'acqua piovana all'interno di queste ultime, si è posto l'obiettivo di ridurre il carico che giunge all'interno della rete fognaria bianca e di effettuare un processo di trattamento.

Prefissato lo scopo da raggiungere, è stato applicato il programma elaborato mediante il software *MATLAB* sulle aree verdi scelte. In questo modo, è stato possibile valutare il comportamento di ogni singola zona verde nel ricevere una portata di acqua di pioggia in ingresso: è stato quindi opportuno confrontare quest'ultima con la portata in uscita dall'area verde, quantificandone i parametri di prestazione (tempo di instaurazione della portata in uscita, tasso di abbattimento, volume trattenuto e tempo di raggiungimento della saturazione dell'area verde).

In un primo momento ogni area verde è stata esaminata fissando il valore dei dati di input del programma: il risultato ottenuto è stato quindi la base per effettuare successivi confronti. Infatti si è scelto di far variare una parte dei dati input, analizzandone l'influenza sulla prestazione della zona verde ed individuandone la configurazione più efficace.

Per tutte le aree verdi scelte, si è stabilito sia di variare lo spessore e la tipologia di terreno, sia di ipotizzare l'inserimento di materiale alveolare. Per quanto concerne invece le aree verdi A e B, è stato fatto variare anche il dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo. Le considerazioni emerse dalle analisi effettuate vengono di seguito riportate.

Variazione dello spessore dell'area verde Per ogni area verde esaminata si è potuto constatare che, all'aumentare dello spessore, si ottiene un miglioramento della prestazione. Sulla base delle analisi effettuate, si è quindi appurato che la configurazione migliore presenta uno spessore illimitato, che consente alla zona verde di assorbire l'acqua di pioggia per tutta la durata dell'evento, senza raggiungere la condizione di saturazione. Questa soluzione però non è sempre realizzabile, ad esempio se l'area è soggetta a problemi di inquinamento e risulta opportuno inserire uno strato che la limiti inferiormente. In base alle prove che sono state attuate, è stata quindi considerata ottimale una configurazione che presenti uno spessore di 0.5 m.

Variazione del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo Per quanto riguarda le aree verdi A e B si è potuto constatare che, all'aumentare del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo, si ottiene un miglioramento della prestazione. In base alle prove che sono state attuate, si è quindi appurato che la configurazione migliore presenta un dislivello pari a 7.5 cm , che consente alla zona verde di abbattere notevolmente il picco della portata in ingresso.

Per quanto concerne invece le aree verdi C e D, si è scelto di mantenere invariato il valore del dislivello tra terreno e bordo dello stramazzo, già di per se sufficientemente elevato.

A causa degli elevati valori di dislivello, per tutte le aree verdi risulta opportuno inserire uno scarico con bocca tarata che, al termine dell'evento di precipitazione, faccia defluire in fognatura lo strato di acqua piovana accumulato. In questo modo non si corre il rischio di danneggiare la vegetazione presente sulla superficie.

Variazione della tipologia di terreno Per ogni area verde esaminata si è potuto constatare che, sostituendo il terreno sabbioso con uno ghiaioso, si ottiene un miglioramento della prestazione. Sulla base delle analisi effettuate, si è quindi appurato che la configurazione migliore presenta un terreno ghiaioso spesso 0.5 m : questa soluzione consente sia di abbattere il picco, sia di trattenere una quota significativa della portata in ingresso.

Presenza di materiale alveolare Per ogni area verde esaminata si è potuto constatare che, inserendo uno strato di materiale alveolare, si ottiene un miglioramento della prestazione. In questo ambito la configurazione migliore prevede di inserire uno strato di materiale alveolare di spessore pari a 0.35 m al di sotto di uno strato di terreno sabbioso di spessore pari a 0.15 m : questa soluzione consente all'area verde di trattenere una quota significativa della portata in ingresso, raggiungendo la condizione di saturazione dopo un tempo notevolmente lungo.

Le configurazioni proposte nell'ambito del presente elaborato di tesi sono risultate valide anche all'aumentare del tempo di ritorno, che influenza negativamente la prestazione delle aree verdi. È quindi necessario sottolineare l'importanza del ruolo svolto dalle zone verdi nel ridurre la portata che, in loro assenza, entrerebbe direttamente all'interno della rete fognaria bianca.

In conclusione al lavoro svolto, si può quindi considerare accertata l'efficacia dell'intervento proposto all'interno dell'area del Politecnico di Torino, sottolineandone anche l'adattabilità ai futuri cambiamenti climatici.

Bibliografia

- [1] Da Deppo L., Datei C. (2005), *Fognature*, Libreria Internazionale Cortina Padova
- [2] Di Molfetta A., Sethi R. (2012), *Ingegneria degli Acquiferi*, Springer
- [3] Dingman S. L. (1994), *Physical Hydrology*, Macmillan College Publishing Company
- [4] Huber J. (2010), *Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas*, University of Arkansas Community Design Center
- [5] Masi F., Rizzo A., Bresciani R. (2018), *Sustainable Rainwater Management in the City: Opportunities and Solutions for the Anthropogenic Environmental Impacts Reduction and Urban Resilience Increase, in "Smart Metropolia"*, Przejście Relacji Publisher: Obszar Metropolitalny Gdansk-Gdynia-Sopot ul.
- [6] Moisello U. (2010), *Idrologia tecnica*, La Goliardica Pavese
- [7] Woods Ballard B., Wilson S., Udale-Clarke H., Illman S., Scott T., Ashley R., Kellagher R. (2015), *The SuDS Manual*, CIRIA
- [8] Comune di Reggio Emilia (2014), *Linee guida per la gestione delle acque meteoriche*
- [9] ISPRA (2012), *Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico*
- [10] Provincia Autonoma di Bolzano (2008), *Linee guida per la gestione sostenibile delle acque meteoriche*
- [11] http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp/
- [12] <https://www.architetturaecosostenibile.it>
- [13] <https://www.susdrain.org/>