



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile-Architettura

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

**ANALISI TECNICA ED ECONOMICA DI SISTEMI DI
GESTIONE DEI DEFLUSSI IN AMBITO URBANO**

**TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF BEST
MANAGEMENT PRACTICES OF URBAN STORMWATER**

Relatore:

Dott. Ing. Luciano Soldini

Laureando:

Jacopo Fantuzzi

Anno Accademico 2020/2021

INTRODUZIONE.....	4
CAPITOLO 1.....	6
1.1 – Premessa.....	6
1.2 - Le conseguenze dell'impermeabilizzazione.....	9
1.3 - Drenaggio urbano sostenibile.....	11
1.3.1 - BMPs e Green Infrastructure negli Stati Uniti.....	12
1.4 - Il principio di Invarianza Idraulica.....	15
1.5 - Quadro Normativo.....	19
1.5.1 - Livello Europeo.....	19
1.5.2 - Livello Nazionale.....	20
1.5.3 - Livello Regionale.....	23
1.5.3.1 – Lombardia.....	23
1.5.3.2 – Emilia-Romagna.....	25
1.5.3.3 – Marche.....	27
1.5.3.3.1 - Sviluppo della verifica di Invarianza Idraulica.....	29
1.5.3.3.2 - Indicazioni per le aree di trasformazione urbana.....	31
1.5.3.3.3 - Indicazioni operative.....	32
1.6 - Sistemi di gestione dei deflussi.....	35
1.6.1 - Opere di laminazione.....	35
1.6.1.1 - Rain Barrel.....	38
1.6.2 - Opere di Infiltrazione.....	39
1.6.2.1 - Trincea d'infiltrazione.....	39
1.6.2.2 - Pavimentazione permeabile.....	41
1.6.2.3 - Pozzo d'infiltrazione.....	42
1.6.2.4 - Caditoia filtrante.....	43

1.6.2.5 - Vasca e bacino d'infiltrazione.....	44
1.6.3 - Tetto verde.....	45
CAPITOLO 2.....	46
2.1 - Descrizione dello studio.....	46
2.1.1 - Parametri generali.....	47
2.1.2 - Combinazioni di scenari.....	48
2.2 - EPA SWMM.....	51
2.2.1 – Modellazione.....	52
2.3 - Impostazione degli scenari.....	53
2.3.1 - Parametri generali del bacino di riferimento.....	53
2.3.2 - Parametri del terreno.....	55
2.3.3 – Precipitazioni.....	57
2.4 - Risposta del bacino.....	60
2.5 - Costruzione dei LID.....	70
2.5.1 - Trincea d'infiltrazione.....	70
2.5.2 - Tetto giardino.....	76
2.5.3 - Asfalto poroso.....	77
2.5.4 - Vasca di laminazione.....	79
2.6 - Inserimento dei LID nei bacino.....	81
2.5.1 - Trincea d'infiltrazione.....	82
2.5.2 - Tetto giardino.....	85
2.5.3 - Asfalto poroso.....	86
2.5.4 - Vasca di laminazione.....	87
2.7 - Risposta dei bacini con LID.....	91

CAPITOLO 3.....	103
3.1 - Stima unitaria dei LID.....	103
3.2 - Estensione LID.....	106
3.3- Costo dell'invarianza idraulica.....	111
3.4- Scenari di drenaggio.....	118
CONCLUSIONI.....	121
BIBLIOGRAFIA.....	123
APPENDICE.....	124
A.1 – SWMM 5.1.....	124
A.2 – Modello concettuale.....	125
A.3 – Oggetti visivi.....	126
A.3.1 – Rain Gages.....	126
A.3.2 – Subcatchments.....	127
A.3.2.1 – Infiltrazione.....	129
A.3.2.2 – Deflusso superficiale.....	130
A.3.3 – LID Controls.....	130

INTRODUZIONE

La continua crescita economica spinge l'uomo a costruire sempre più, consumando suolo e impermeabilizzando superfici nelle aree urbane; ciò interferisce con il naturale ciclo idrologico delle acque meteoriche, causando un'instabilità nel sistema ambientale nel luogo in cui le trasformazioni vengono attuate. Ciò si traduce in particolar modo nell'inquinamento delle acque e nell'incremento dei deflussi superficiali, a cui contribuiscono tra l'altro i cambiamenti climatici in corso causando eventi meteorici sempre più intensi.

Negli ultimi decenni questa problematica è divenuta sempre più evidente e ha spinto molte nazioni a correre ai ripari creando regolamenti, metodologie e soluzioni al fine di ridurre il rischio idraulico e l'inquinamento. Uno dei cardini di questa nuova gestione dell'acqua meteorica è il principio di Invarianza Idraulica, il quale viene adottato dalle amministrazioni italiane e nel mondo, con l'obiettivo di associare ad ogni intervento impermeabilizzante delle operazioni in grado di annullare l'incremento di deflusso, affinché la condizione idraulica locale precedente la trasformazione non vari.

L'obiettivo di questo studio è stato quello di analizzare la risposta idrologica di un bacino idrografico soggetto a livelli crescenti di impermeabilizzazione, e stimare il costo di applicazione del principio di invarianza idraulica ottenuta mediante l'utilizzo di BMP.

Nel primo capitolo viene introdotto il problema dell'impermeabilizzazione, le sue

conseguenze e il drenaggio urbano sostenibile come soluzione. Vengono inoltre descritte le normative e le metodologie utilizzate nei vari livelli amministrativi.

Nel secondo capitolo viene descritta l'impostazione e lo svolgimento dell'analisi tecnica di quattro sistemi di gestione dei deflussi urbani, per valutarne il comportamento in diversi scenari e l'efficacia nell'ottenimento dell'invarianza idraulica.

Nel terzo capitolo viene svolta l'analisi economica che utilizzando la misura dell'efficacia dei sistemi di drenaggio ricavata nel secondo capitolo, cerca di stabilire il costo dell'invarianza idraulica.

CAPITOLO 1

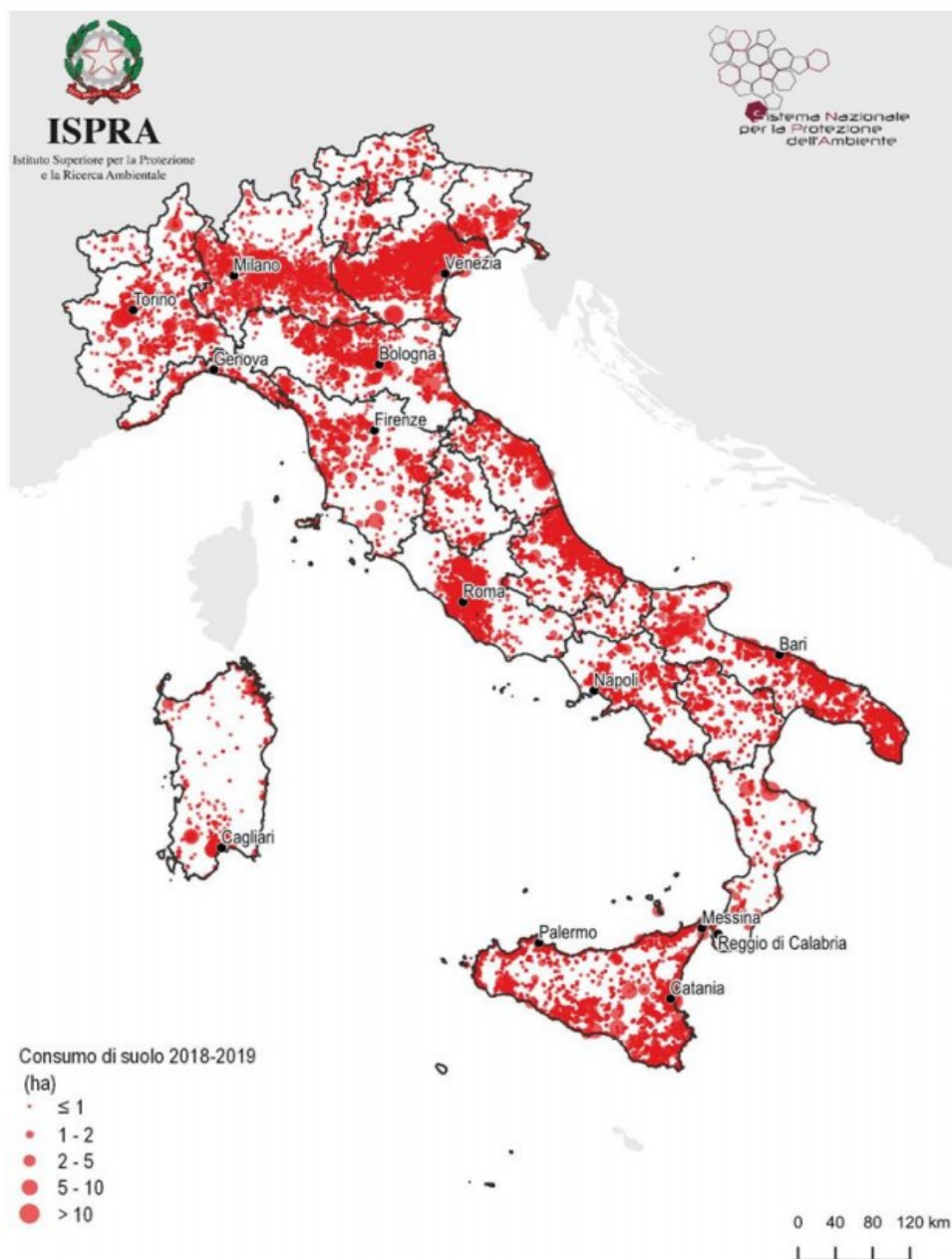
1.1 - Premessa

L'atto di coprire il terreno naturale con materiale impermeabile, necessario per lo sviluppo urbano e la costruzione di infrastrutture, è conosciuto come "impermeabilizzazione del suolo". Le aree impermeabilizzate perdono, in parte o del tutto, la capacità di svolgere funzioni ecologiche, come il filtraggio degli inquinanti, nonché modificano il modello stabile di deflusso presente costringendo i terreni circostanti a subirne gli effetti.

Il maggiore impatto dell'impermeabilizzazione del suolo è osservabile nelle aree urbane e metropolitane, in cui la superficie di terreno naturale è minima e il normale ciclo dell'acqua è fortemente alterato. In molti paesi industrializzati il consumo del suolo è molto alto e gli spazi per ulteriore urbanizzazione sono ormai limitati. Presumibilmente, gran parte del futuro sviluppo avverrà nelle periferie o nei loro confini.

L'impermeabilizzazione in Europa Centrale e Orientale è stata significativa nelle ultime decadi, a seguito dei cambiamenti a livello politico ed economico di fine anni '80 che portarono le popolazioni a migrare dalle aree di campagna verso le città. La crescente espansione dell'unione europea, il mercato unico ed il turismo richiederanno negli anni a venire nuove infrastrutture di collegamento per favorire il movimento di beni e persone.

In Italia, il consumo di suolo sembra non arrestarsi e solamente nell'ultimo anno le nuove coperture artificiali sono state di 57.5 km², in media 16 ettari al giorno. Questo dato è particolarmente allarmante se si tiene conto del calo delle nascite, cosa che contribuisce a portare la quantità di superficie impermeabile per abitante a 355 m². (ISPRA, *Report SNPA 2020*)



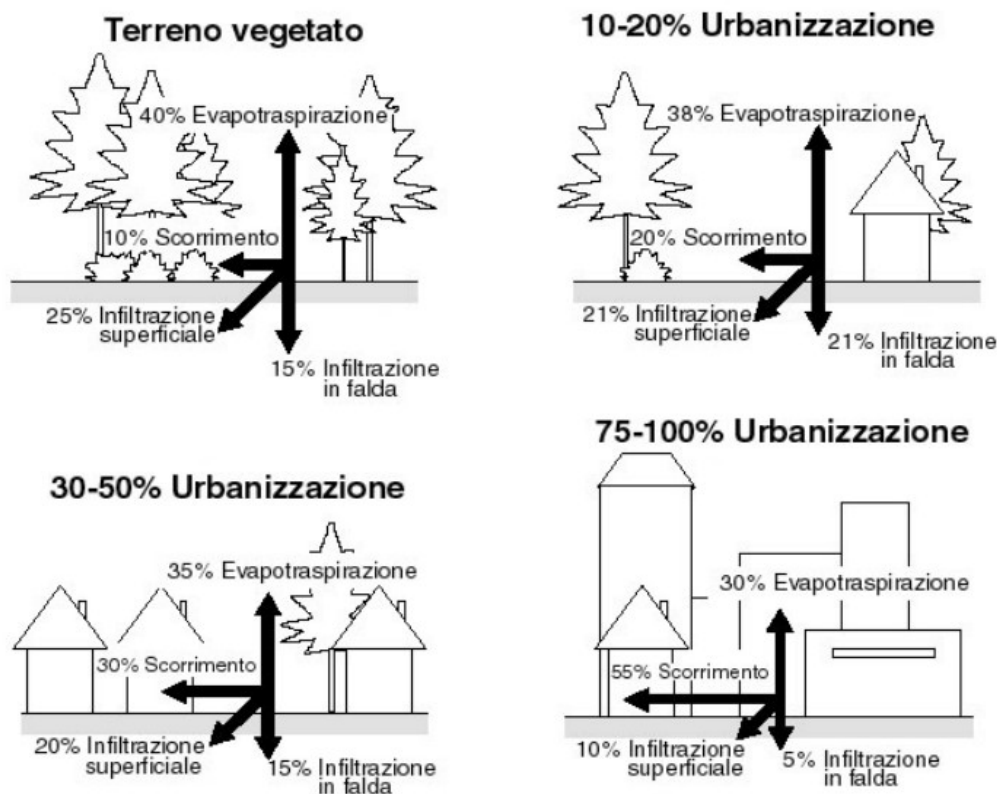
(Fig. 1.1, ISPRA, Localizzazione dei principali cambiamenti dovuti al consumo di suolo tra il 2018 e il 2019)

In Fig. 1.1 viene mostrata la distribuzione dell'impermeabilizzazione sul territorio italiano, che si concentra in particolar modo nelle zone più industrializzate e sulla costa adriatica.

La crescita economica sembra esser quindi destinata ad aumentare il consumo di suolo, e le strategie di pianificazione territoriale giocano un ruolo fondamentale nel contenerne gli effetti negativi. C'è la necessità di un sistema razionale per pianificare l'utilizzo dei terreni e delle risorse naturali, al fine di favorire un'urbanizzazione sostenibile.

1.2 - Le conseguenze dell'impermeabilizzazione

Il ciclo dell'acqua si compone di molti processi fisici, ed ai fini di questo studio sono di particolare rilevanza quelli di infiltrazione e scorrimento. L'infiltrazione è il processo attraverso cui l'acqua dalla superficie entra nel terreno per forza gravitazionale e capillare, in quantità e con una velocità che dipendono dalla tessitura, struttura e morfologia del suolo. Quando il terreno raggiunge la saturazione, si ha lo scorrimento dell'acqua in superficie (Fig. 1.2).



(Fig. 1.2, adattato da Arnolds and Gibbons, Effetti dell'urbanizzazione sul ciclo dell'acqua)

Questi processi fanno sì che l'acqua venga trattenuta, filtrata e rilasciata gradualmente attraverso percorsi tortuosi e diffusi, permettendo alla vegetazione di svilupparsi, alle falde acquifere di ricaricarsi e innescando una serie di processi

ecologici di vitale importanza per gli equilibri ambientali. Un bacino naturale è quindi caratterizzato da un colmo di portata relativamente modesto ed una durata delle portate molto lunga.

L'impermeabilizzazione blocca in parte o del tutto il processo di infiltrazione, portando ad un accumulo di acqua in superficie che viene canalizzata ed accelerata, riducendo i tempi di corrivazione ed aumentando significativamente i picchi di piena. Inoltre, il sistema ecologico viene privato dell'acqua e gli equilibri ambientali ne risultano compromessi.

E' importante notare come un'aumento del consumo di suolo corrisponda non solo ad un maggior costo a livello ambientale, ma anche ad una spesa aggiuntiva per l'incremento del deflusso, il quale andrà raccolto, gestito e scaricato.

1.3 - Drenaggio urbano sostenibile

L'approccio tradizionale al drenaggio urbano propone di raccogliere tutti i deflussi meteorici dalle superfici impermeabilizzate per immetterli all'interno della rete fognaria, trattandoli ed scaricandoli all'interno di un corpo idrico recettore. Questa metodologia ha determinato l'insorgenza di numerosi effetti negativi oltre a quelli già menzionati, tra i quali possibile sovraccarico della rete fognaria, alterazione del regime ed inquinamento del corpo idrico recettore. Queste problematiche minano alla salvaguardia dell'ambiente e dell'uomo e sono ulteriormente accentuate dagli effetti dei cambiamenti climatici in atto.

Al fine di trovare una soluzione al problema, si è messa in luce l'esigenza di adottare un approccio più efficiente ed innovativo nel gestire le acque meteoriche nelle aree urbane. In questo ambito si inserisce quindi il concetto di "drenaggio urbano sostenibile",

Il drenaggio urbano sostenibile è una metodologia che favorisce il mantenimento del naturale comportamento idrologico del bacino o, per le aree urbanizzate, il ritorno ai valori precedenti alle trasformazioni antropiche. Si tratta di un insieme di strategie, tecnologie e pratiche volte a limitare i fenomeni di allagamento urbano, a contenere gli apporti d'acqua ai corpi idrici ricettori e a ridurre il degrado qualitativo. Questo avviene grazie alla riduzione della quantità di deflusso prodotto, al trattamento e alla laminazione diffusa da attuarsi a monte dell'immissione delle acque meteoriche nella rete di drenaggio urbano. Sono compresi sia interventi di carattere gestionale della risorsa idrica (regolamenti, programmi di sensibilizzazione ed educativi, ...) sia l'impiego di soluzioni costruttive ad integrazione o sostituzione dei sistemi di

drenaggio tradizionali.

Le esperienze in tale senso sono iniziate quasi mezzo secolo fa in Germania, dove sono ormai entrate nella pratica comune, e si sono poi diffuse ampiamente in molti altri paesi del nord Europa e in quelli extra-europei (in particolare Gran Bretagna e Olanda da una parte, e Nord America e Australia dall'altra).

1.3.1 - BMPs e Green Infrastructure negli Stati Uniti

Le Best Management Practices (BMPs) possono essere suddivise in pratiche non strutturali sotto forma di regolamenti e procedure ad opera delle amministrazioni locali, e pratiche strutturali per quanto riguarda i dispositivi installati o costruiti in sito. Le soluzioni strutturali possono richiedere la disponibilità di grandi superfici per la realizzazione di misure a controllo territoriale (bacini di detenzione, vasche volano, ecc.) o concentrarsi su interventi ad una scala più limitata fino al dettaglio costruttivo; tra le BMPs si distinguono le LIDs – Low Impact Development(s), misure sostenibili a basso impatto ambientale volte al ripristino del ciclo idrologico urbano, attraverso l'uso di sistemi vegetati e di infiltrazione quali pavimentazioni permeabili, strisce filtro inerbite e trincee di infiltrazione. Più recentemente l'US EPA, ne fa riferimento con il termine Green Infrastructure ovvero "infrastruttura verde".

L' Environment Protection Agency (EPA) è un'agenzia esecutiva indipendente del governo federale degli Stati Uniti e ha il ruolo di gestire le materie concernenti la protezione dell'ambiente. L'agenzia si occupa di valutazioni ambientali, ricerca ed educazione. Essa ha la responsabilità di mantenere e imporre gli standard nazionali

attuando le leggi ambientali, consultandosi con gli stati e le amministrazioni locali. L'EPA lavora con le industrie e i governi ad ogni livello tramite una larga varietà di programmi di prevenzione dell'inquinamento e di conservazione dell'energia e delle risorse naturali.

La sezione 502 del Clean Water Act (1972) definisce "Green Infrastructure" l'insieme delle misure che utilizzano sistemi vegetativi o di suolo, pavimentazioni permeabili o altre superfici permeabili, raccolta e riutilizzo delle acque di pioggia, o infrastrutture per immagazzinare, infiltrare o evapotraspirare acque di pioggia e ridurre l'apporto d'acqua ai sistemi fognari o al deflusso superficiale.

Quello della Green Infrastructure è un approccio efficiente a livello di costi per gestire l'impatto delle piogge e garantire benefici ambientali, sociali ed economici alla comunità in cui viene adottata. L'acqua non viene semplicemente portata via dal costruito, ma resa parte dell'ambiente urbano e riutilizzata in modo produttivo.

Il deflusso causato dalle precipitazioni è una delle cause principali dell'inquinamento dell'acqua nelle aree urbane. Quando la pioggia cade sulle coperture, strade e parcheggi nelle città e nelle periferie, l'acqua colleziona rifiuti, batteri, metalli pesanti ed altri inquinanti provenienti dall'ambiente urbano. Viene poi raccolta dal sistema fognario per poi essere scaricata in corpi d'acqua vicini.

Nelle zone non urbanizzate invece, l'acqua è in grado di infiltrarsi nel terreno, il quale insieme alla vegetazione svolge un ruolo filtrante e di pulizia. Questo è un ruolo della Green Infrastructure, la quale cerca di dar nuova vita ad alcuni dei processi naturali necessari a gestire l'acqua per creare ambienti urbani più salutarì.

La Green Infrastructure, inoltre, crea habitat per la fauna locale e contribuisce alla qualità dell'aria e del paesaggio. Ne vengono riportati alcuni esempi (Fig. 1.3)

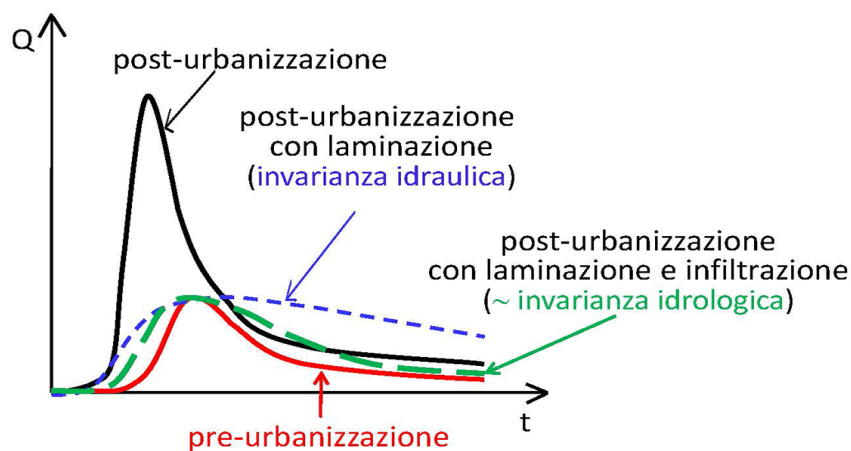


(Fig. 1.3, Esempi di Green Infrastructure)



1.4 - Il principio di Invarianza Idraulica

La progressiva impermeabilizzazione dei suoli rappresenta dunque in molti contesti una minaccia per la sicurezza idraulica del territorio, che già oggi richiede ingenti interventi sull'assetto idrografico per consentire la riduzione dei rischi a livelli socialmente accettabili.



(Fig 1.4, Curva portata-tempo del deflusso di acque meteoriche)

La Fig 1.4 mostra come varia il deflusso delle acque meteoriche nel tempo, con $t=0$ quando inizia la precipitazione. La curva di post-urbanizzazione è caratterizzata da una elevata portata al colmo a causa dell'impermeabilizzazione che blocca il processo svolto dal terreno di infiltrazione e ritenzione dell'acqua, la quale accumulandosi in superficie viene necessariamente e rapidamente raccolta e smaltita in grandi quantità dal sistema fognario. Se le fognature non sono in grado di gestire la quantità d'acqua in ingresso, si verificano allagamenti di entità relativa all'acqua in eccesso. Ciò costringe le amministrazioni locali ad ingenti spese per la costruzione e l'ampliamento dei sistemi fognari, nonché a riparare i danni causati

dall'acqua. In Italia, al fine di risolvere queste problematiche si utilizza il principio di Invarianza Idraulica, che mira a ridurre la portata al colmo con la laminazione dei volumi o incrementando la quota di acque meteoriche smaltite tramite infiltrazione o evapotraspirazione.

Pertanto, ogni intervento che provoca impermeabilizzazione dei suoli ed aumento della velocità di corrivazione deve prevedere azioni correttive al fine di mitigarne gli effetti, e se vengono attuate in modo da "*...mantenere i colmi di piena prima e dopo la trasformazione inalterati, si parla di invarianza idraulica delle trasformazioni di uso del suolo*" (Pistocchi, 2001).

Con il termine d'invarianza idrologica invece, s'intende che, non solo le portate, ma anche i volumi di deflusso meteorico non debbano essere maggiori di quelli preesistenti.

Il progetto delle opere di laminazione richiede l'individuazione del volume necessario ad accumulare gli eccessi di portata, il quale può essere calcolato attraverso l'equazione di continuità(1.1). Il volume ΔW è funzione della portata massima entrante nella vasca (Q_e) e uscente (Q_u), entrambe riferite ad un certo periodo di tempo Δt :

$$\Delta W = Q_e \cdot \Delta t - Q_u \cdot \Delta t \quad (1.1)$$

Per una maggiore semplicità nella progettazione e nella pianificazione degli interventi urbanistici, diverse Autorità di Bacino hanno proposto dei metodi per il calcolo dei

volumi di invaso e formule semplificate attraverso le quali è possibile calcolare velocemente la capacità richiesta alle opere di laminazione.

Alcuni dei metodi proposti, a differenza dei precedenti approcci empirici, consentono fra l'altro di mettere in relazione l'entità del volume di invaso richiesto con il tasso di impermeabilizzazione dei suoli previsto dall'intervento. Si può così associare agli indici di fabbricazione previsti dal piano comunale i volumi di invaso necessari per annullare gli effetti idrologici negativi dovuti all'impermeabilizzazione, ricorrendo alla laminazione delle piene. Inoltre, permettono di applicare il principio del "chi consuma paga", trasferendo ad ogni intervento sul territorio il costo dell'effetto idrologico che esso finirà per comportare: chi attua grandi impermeabilizzazioni si dovrà accollare l'onere di volumi consistenti per la laminazione delle piene, mentre chi impermeabilizza il suolo in misura più modesta dovrà realizzare volumi più contenuti. Oltre alle strutture per la laminazione, è possibile impiegare dispositivi di tipo diffuso che in aggiunta alla funzione laminativa, favoriscono il processo di infiltrazione nel sottosuolo (BMPs e LIDs) (Fig. 1.5).



(Fig. 1.5a) Esempio di "infiltration planters", raccolgono l'acqua da marciapiedi e strade, la immagazzinano e riutilizzano per la vegetazione.



(Fig. 1.5b) Esempio di "bioswale", che oltre ad una funzione ecologica è anche in grado di trasportare grandi volumi d'acqua da un luogo all'altro.



(Fig. 1.5c) Esempio di bacino di ritenzione, in cui vengono raccolte le acque di pioggia per la loro laminazione e infiltrazione

1.5 - Quadro Normativo

La moderna gestione delle acque meteoriche integra la quantità alla qualità della risorsa idrica che negli ultimi anni è diventata sempre più scarsa, promuovendo politiche sostenibili di riuso, garantendo un buono stato ecologico e chimico. Queste politiche di gestione integrata, intraprese a livello nazionale, interregionale e regionale, si basano sui principi dettati dalle direttive, emanate a livello europeo; pertanto esso costituisce il punto di partenza per delineare il percorso normativo a cui il principio dell'invarianza idraulica e idrologica è connesso.

1.5.1 - Livello europeo

Negli anni '90 sono state emanate delle direttive inerenti al trattamento delle acque reflue urbane, alla lotta contro l'inquinamento idrico prodotto da nitrati di origine agricola e agli standard relativi all'acqua potabile, destinata quindi al consumo umano. L'attuazione di queste direttive rappresenta un passo molto importante per il conseguimento degli obiettivi ambientali della Direttiva Acque del 2000, che cerca di superare gli approcci e gli strumenti settoriali, mettendo a sistema tutti gli ambiti che si occupano dell'uso della risorsa, istituendo il Piano di gestione a livello di distretto idrografico. La stessa promuove, inoltre, un'azione che limiti le emissioni e fissi standard di qualità da raggiungere entro il 2015.

Nel 2007 è stata poi emanata la Direttiva Alluvioni, introducendo il Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) a livello di distretto idrografico, con lo scopo di "... *ridurre gli impatti negativi delle alluvioni sulla salute, l'economia, l'ambiente e favorire dopo un*

intervento alluvionale una tempestiva ricostruzione e valutazione post-evento" (PGRA, 2015, p.2); vengono quindi realizzate da ogni Stato Membro, mappe di pericolosità e rischio inondazione riferite al proprio territorio nazionale.

1.5.2 - Livello nazionale

La normativa nazionale Italiana aveva già introdotto la valutazione di rischio idraulico con l'emanazione della Legge n.183/1989 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo", la quale usciva dal precedente approccio, costituito da specifiche attività slegate l'una dall'altra, perseguendo il fine di proteggere il suolo attraverso delle azioni coordinate e integrate fra loro, frutto di una cooperazione tra Stato e Regioni . La Legge rappresentava il primo tentativo di approccio integrato tra pianificazione, acqua e suolo, introducendo il Bacino Idrografico come ambito di riferimento e individuando come soggetto a carico della gestione le Autorità di Bacino.

Alla fine degli anni '90, il verificarsi di una serie di eventi catastrofici ha portato la normativa italiana a focalizzarsi sulla necessità di prendere provvedimenti per prevenire il rischio idrogeologico, ed a ciò risultò la legge n.267/1998, recante misure urgenti a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania. Essa cerca di accelerare le attività di pianificazione e programmazione in materia di difesa del suolo da parte delle Autorità di Bacino, in modo da adottare i Piani stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI). Attraverso questo strumento si intende individuare le aree soggette a rischio idrogeologico, classificate secondo quattro classi di rischio progressivo (R1, R2, R3, R4) e definire, di conseguenza, le misure di salvaguardia e

gli usi compatibili con ciascuna di esse.

Il Decreto legislativo n. 152 del 2006 “Norme in materia ambientale”, è stato redatto al fine di integrare e riorganizzare le precedenti normative, oltre che avere come fine il recepimento della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE. Nella parte terza vengono esplicitate le “Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall’inquinamento e di gestione delle risorse idriche”, secondo le quali gli Enti preposti devono svolgere azioni di carattere conoscitivo, di programmazione e pianificazione degli interventi e la loro realizzazione. Il Decreto abolisce le Autorità di bacino previste dalla Legge 183 del 1989, istituendo l’Autorità di bacino distrettuale, che di fatto esercita tutte le funzioni delle precedenti, elaborando il Piano di bacino distrettuale, in linea con gli obiettivi degli altri piani comunitari, nazionali, regionali e locali relativi alla difesa del suolo e alla tutela delle risorse idriche. A seguito del recepimento della Direttiva Acque, il territorio nazionale viene suddiviso inizialmente in otto distretti idrografici. Successivamente la legge 221 del 2015 modifica i perimetri di tali distretti, riducendo il loro numero a sette (Fig. 1.6).

Il Decreto legislativo 49/2010, “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni”, ha lo scopo di recepire la Direttiva Alluvioni a livello nazionale, definendo le competenze delle Autorità di bacino distrettuali, stabilite dal Decreto legislativo 152/2006, nell’ambito della gestione del rischio di alluvioni. A tali enti compete l’adozione dei Piani stralcio di distretto per l’assetto idrogeologico. Le regioni, in accordo tra loro e con il Dipartimento nazionale della protezione civile predispongono e attuano il sistema di allertamento nazionale, per il distretto idrografico di riferimento per far fronte al rischio delle piene.



(Fig. 1.6, ISPRA, suddivisione dei distretti idrografici sul territorio italiano)

1.5.3 - Regionale

Come si è visto il principio dell'invarianza idraulica e idrologica discende da un inter-normativo molto complesso, che ha riguardato la materia idrica in tutti i suoi aspetti a livello europeo, nazionale e interregionale. Si presenta di seguito la metodologia per l'applicazione del principio dell'invarianza idraulica e idrologica nella regione Lombardia, in quanto presenta un regolamento molto dettagliato e completo di approccio, e dell'Emilia-Romagna, che oltre ad essere fra le prime regioni a redarre regolamenti per affrontare il problema della gestione dei deflussi superficiali, è un importante punto di partenza per la normativa della Regione Marche.

1.5.3.1 - Lombardia

La prima Legge Regionale lombarda n. 12 del 2005 negli anni subisce revisioni e implementazioni, modificando articoli o aggiungendone di nuovi. Una delle più importanti revisioni è avvenuta nel 2016 con la Legge Regionale n. 4, contenente la revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo. Essa aggiunge tramite l'articolo 7, il comma 58 bis nella Legge Regionale 12/2005, stabilendo come ambito di applicazione gli *“interventi edilizi definiti dall'articolo 27, comma 1, lettere a), b) e c) e a tutti gli interventi che comportano una riduzione della permeabilità del suolo rispetto alla sua condizione preesistente all'urbanizzazione, secondo quanto specificato nel regolamento regionale di cui al comma 5. Sono compresi gli interventi relativi alle infrastrutture stradali e autostradali e loro pertinenze e i parcheggi”* (Legge Regionale 12/2005, articolo 58 bis, comma 2). Inoltre da una definizione dell'invarianza idraulica e idrologica e l'ambito di applicazione nel territorio.

Ad essa segue il 23 novembre 2017, un regolamento recante “*i criteri e metodi per il rispetto del principio dell'invarianza idraulica ed idrologica ai sensi dell'articolo 58 bis della legge regionale 11 marzo 2005, n. 12 (Legge per il governo del territorio)*”. Il suo fine è la definizione degli ambiti territoriali di applicazione, differenziandoli in funzione del livello di criticità idraulica dei bacini e dei corsi d'acqua ricettori, stabilendo per ognuno di essi il valore massimo della portata meteorica scaricabile nei ricettori per il rispetto del principio dell'invarianza idraulica e idrologica. Il primo obiettivo che si pone la Lombardia nel regolamento, è la classificazione del proprio territorio regionale in aree A, B e C, rispettivamente ad alta, media e bassa criticità idraulica. Ad ogni ambito è assegnato un valore massimo ammissibile di scarico per ettaro di superficie scolante impermeabile. In questo modo, mediante l'adozione di interventi atti a contenere l'entità delle portate scaricate entro valori compatibili con le capacità idrauliche dei ricettori, è possibile limitare gli scarichi delle aree soggette a trasformazione urbanistica, evitando il sovraccarico dei corpi idrici riceventi.:

- Per le aree A, 10 l/s per ettaro di superficie scolante impermeabile;
- Per le aree B, 20 l/s per ettaro di superficie scolante impermeabile;
- Per le aree C, 20 l/s per ettaro di superficie scolante impermeabile.

Il gestore del corpo ricevente può imporre limiti più restrittivi di quelli sopra elencati, qualora sia limitata la capacità idraulica del ricevente stesso, ovvero ai fini della funzionalità del sistema di raccolta e depurazione delle acque.

Per quanto riguarda le modalità di calcolo dei volumi da gestire, il regolamento prescrive di adottare il “metodo delle sole piogge” nel caso di impermeabilizzazione

potenziale media, in ambiti territoriali a criticità alta o media. Nel caso di impermeabilizzazione potenziale alta, in ambiti territoriali a criticità alta o media, prescrive di adottare la “procedura di calcolo dettagliata”. La prima è una metodologia che fornisce *“una valutazione del volume di invaso dell’opera di mitigazione sulla base della sola conoscenza della curva di possibilità pluviometrica e della portata massima, ipotizzata costante, che si vuole in uscita dall’opera stessa”* (Manuale SuDS, 2018, p.32), mentre la seconda prevede uno studio idrologico del deflusso sulla superficie di trasformazione che nel regolamento, a titolo esemplificativo, è svolto attraverso il “metodo cinematico”, detto “della corrivazione”, con infiltrazione secondo il modello di Horton.

1.5.3.2 - Emilia-Romagna

Negli anni '90 in Emilia Romagna l'Autorità di Bacino del Reno e il Comune di Faenza hanno introdotto nei rispettivi strumenti di pianificazione delle misure con l'obiettivo di garantire l'invarianza idraulica della trasformazione degli usi del suolo. Queste misure prescrivono volumi di invaso da posizionare a monte del recapito delle acque superficiali, per la laminazione delle piene. I volumi d'invaso richiesti venivano fissati tuttavia in termini del tutto arbitrari, e risultavano spesso eccessivi o insufficienti.

Con il Piano Regolatore di Cesena-Variante Generale 2000 è stata proposta per la prima volta una metodologia operativa di calcolo dei volumi d'invaso richiesti per garantire l'invarianza idraulica; La proposta è stata successivamente affinata ed estesa a tutto il territorio attraverso il piano stralcio per il rischio idrogeologico da

parte dell'Autorità dei Bacini Romagnoli.

Detta "I" la quota dell'area oggetto della trasformazione, e "P" la quota che viene lasciata inalterata (tale che $I+P=1$, ovvero il 100% dell'area), definisce il volume minimo d'invaso per l'area pari a (1.2):

$$w = w'(\varphi/\varphi') \cdot (1/(1-n)) - 15I - w'P \quad (1.2)$$

con $w' = 50$ mc/ha, φ = coefficiente di deflusso dopo la trasformazione, φ' = coefficiente di deflusso prima della trasformazione, n = parametro noto in idrologia come esponente della curva di possibilità climatica. Il volume così ricavato è espresso in mc/ha e va moltiplicato per l'area dell'intervento. Per la stima dei coefficienti di deflusso φ e φ' si fa riferimento alla relazione convenzionale:

$$\varphi' = 0.9 Imp' + 0.2 Per' \quad (1.3 a)$$

$$\varphi = 0.9 Imp + 0.2 Per \quad (1.3 b)$$

in cui Imp e Per sono rispettivamente le quote dell'area totale impermeabile e permeabile, prima della trasformazione (1.3 a) o dopo (1.3 b). Operativamente, i Comuni possono definire gli indici di fabbricazioni inserendo nelle valutazioni tecnico-economiche ed ambientali la necessità di mantenere invariati i colmi di piena proveniente dai lotti di trasformazione, ed in particolare di nuova edificazione. In questo modo il singolo progettista può scegliere autonomamente il tasso di impermeabilizzazione connessa ad una trasformazione di uso del suolo, associandovi un intervento mitigativo proporzionato, e ciò consente l'applicazione del

principio di invarianza idraulica delle trasformazioni urbane non solo su grandi interventi ma su tutte le trasformazioni d'uso del suolo, in modo più equo ed efficace.

1.5.3.3 - Marche

Nella Regione Marche la gestione delle acque meteoriche fa riferimento alla Legge Regionale del 23 novembre 2011 n.22:

Norme in materia di riqualificazione urbana sostenibile e assetto idrogeologico e modifiche alle Leggi regionali 5 agosto 1992, n. 34 "Norme in materia urbanistica, paesaggistica e di assetto del territorio" e 8 ottobre 2009, n. 22 "Interventi della regione per il riavvio delle attività edilizie al fine di fronteggiare la crisi economica, difendere l'occupazione, migliorare la sicurezza degli edifici e promuovere tecniche di edilizia sostenibile"

in particolare, al CAPO II assetto idrologico del territorio, si ha:

Art. 10 (Compatibilità idraulica delle trasformazioni territoriali)

1. Gli strumenti di pianificazione del territorio e le loro varianti, da cui derivi una trasformazione territoriale in grado di modificare il regime idraulico, contengono una verifica di compatibilità idraulica, volta a riscontrare che non sia aggravato il livello di rischio idraulico esistente, né pregiudicata la riduzione, anche futura, di tale livello.

2. Ai fini di cui al comma 1, la verifica di compatibilità valuta l'ammissibilità degli interventi di trasformazione considerando le interferenze con le pericolosità

idrauliche presenti e la necessità di prevedere interventi per la mitigazione del rischio, indicandone l'efficacia in termini di riduzione della specifica pericolosità.

3. Al fine altresì di evitare gli effetti negativi sul coefficiente di deflusso delle superfici impermeabilizzate, ogni trasformazione del suolo che provochi una variazione di permeabilità superficiale deve prevedere misure compensative rivolte al perseguimento del principio dell'invarianza idraulica della medesima trasformazione.

4. La Giunta regionale stabilisce i criteri per la redazione della verifica di compatibilità idraulica degli strumenti di cui al comma 1, nonché le modalità operative e le indicazioni tecniche relative ai commi 2 e 3, anche con riferimento ad aree di recupero e di riqualificazione urbana.

5. Le opere necessarie per il perseguimento delle finalità di cui al presente articolo e relative alla riduzione del rischio idraulico (opere di difesa fluviale, invasi compensativi, aree verdi conformate in modo da massimizzare la capacità di invaso e laminazione e simili) e geologico (rilevati e valli artificiali e simili) sono classificate tra le opere di urbanizzazione primaria e le aree cui vengono conferite funzioni mitigative o compensative devono essere ricomprese nel perimetro considerato, anche se non strettamente contigue alle aree di trasformazione.

Come specificato nel comma 4 dell'art. 10, la Giunta regionale con la Delibera del 27 gennaio 2014 n. 53 stabilisce i criteri, le modalità e le indicazioni tecnico-operative per la redazione della verifica di compatibilità idraulica degli strumenti di pianificazione territoriale e per l'invarianza idraulica delle trasformazioni territoriali. Gli

stessi vengono poi successivamente modificati con la Delibera n. 671 del 20 giugno 2017.

1.5.3.3.1 Sviluppo della verifica di Invarianza Idraulica

Nelle *"Linee Guida B –Sviluppo della verifica per l'Invarianza Idraulica"* viene definito il principio di Invarianza Idraulica, già introdotto al comma 3, art.10: *“Per trasformazione del suolo ad invarianza idraulica si intende la trasformazione di un’area che non provochi un aggravio della portata di piena del corpo idrico ricevente i deflussi originati dall’area stessa.”*

Ogni trasformazione che preveda l'impermeabilizzazione parziale o totale della superficie dell'area interessata, impedendo all'acqua di infiltrarsi, deve quindi prevedere degli interventi atti a contrastare l'incremento della portata di piena, che le linee guida individuano con due meccanismi di controllo: l'infiltrazione con conseguente immagazzinamento delle piogge nel suolo, e la laminazione, ovvero l'immagazzinamento dei deflussi nei volumi disponibili nel bacino prima di poter raggiungere la sezione di chiusura.

Viene evidenziato che *"l'obiettivo dell'invarianza idraulica richiede a chi propone una trasformazione di uso del suolo di accollarsi, attraverso opportune azioni compensative, gli oneri del consumo della risorsa territoriale costituita dalla capacità di un bacino di regolare le piene e quindi di mantenere le condizioni di sicurezza del territorio nel tempo."*

Inoltre, l'invarianza idraulica non deve solamente essere riferita alla portata scaricata nel corpo idrico ricettore, ma sono necessari ulteriori elementi progettuali per il raggiungimento delle prestazioni attese:

a) E' opportuno convogliare le acque nello stesso ricettore dello stato di fatto, in modo da non aggravare altre reti.

b) E' buona norma mantenere inalterata la quota del piano campagna oggetto di trasformazione, poichè ciò potrebbe causare disagi di carattere idraulico alle aree limitrofe.

c) E' opportuno mantenere la capacità di scolo delle aree limitrofe al lotto in trasformazione, realizzando fossi o condotte di gronda sul perimetro dell'area d'intervento per isolarla idraulicamente dalle aree circostanti e raccogliere le acque provenienti dalle aree di monte, se necessario trattenerle, e convogliarle verso valle.

Per quanto riguarda il calcolo dei volumi d'invaso la normativa marchigiana non si distingue da quella emiliana, per cui la metodologia e le formule utilizzate rimangono invariate.

1.5.3.3.2 – Indicazioni per le aree di trasformazione urbana

La classificazione degli interventi di trasformazione delle superfici viene effettuata in relazione alla dimensione e alla percentuale di superficie impermeabile, come segue (Tab. 1.1):

Classe di Intervento	Definizione
Trascurabile impermeabilizzazione potenziale	intervento su superfici di estensione inferiore a 0.1 ha
Modesta impermeabilizzazione potenziale	Intervento su superfici comprese fra 0.1 e 1 ha
Significativa impermeabilizzazione potenziale	Intervento su superfici comprese fra 1 e 10 ha; interventi su superfici di estensione oltre 10 ha con $Imp < 0,3$
Marcata impermeabilizzazione potenziale	Intervento su superfici superiori a 10 ha con $Imp > 0,3$

(Tab. 1.1, classificazione delle trasformazioni delle superfici ai fini dell'invarianza idraulica)

I parametri fondamentali che portano ad un'efficace processo di laminazione sono la dimensione delle luci di scarico dell'invaso e il tirante idrico massimo dell'invaso, i quali controllano la portata in uscita.

a) Nel caso di "Trascurabile impermeabilizzazione" viene richiesto il soddisfacimento dei requisiti dimensionali della formula per il calcolo dei volumi d'invaso (1.2).

b) Per interventi di "Modesta impermeabilizzazione", va inoltre verificato che le luci di scarico non eccedano le dimensioni di un tubo di diametro 200mm e che i tiranti idrici ammessi nell'invaso non superino il metro.

c) Nei casi di "Significativa impermeabilizzazione" vanno dimensionate le luci di scarico e i tiranti idrici in modo da garantire l'invarianza idraulica, almeno per una durata di pioggia di 2 ore e un tempo di ritorno di 30 anni.

d) Infine, per quanto riguarda gli interventi classificati come "Marcata impermeabilizzazione" è richiesto uno studio di maggior dettaglio, i cui contenuti sono specificati nelle linee guida.

Per a) e b) come alternativa all'utilizzo della formula(1.2) è permesso dimensionare l'invaso pari a 350m² per ogni ettaro di superficie impermeabilizzata. Per c) e d), qualora l'area oggetto di studio sia già impermeabilizzata, viene imposta la portata massima in uscita, espressa da un coefficiente udometrico pari a 20 l/(s*ha). Nei casi in cui questo valore sia difficilmente raggiungibile, spetta all'Autorità Idraulica o al Gestore del Servizio Idrico Integrato (SII) valutare il progetto e rilasciare le relative autorizzazioni.

1.5.3.3.3 – Indicazioni operative

Vengono presentati degli schemi per la realizzazione dei volumi d'invaso (Fig. 1.7), i quali normalmente sono realizzati come aree di espansione posti a monte del punto di scarico, al fine di evitare la necessità di scolo meccanico. Essi sono visti come aree periodicamente allagabili e devono essere drenati in condizioni di tempo asciutto, al fine di evitare problematiche igienico-sanitarie. Alcune tipologie di soluzione sono:

a) vasca in c.a. o altro materiale "rigido" posizionata a monte del punto di scarico,

aperta o coperta;

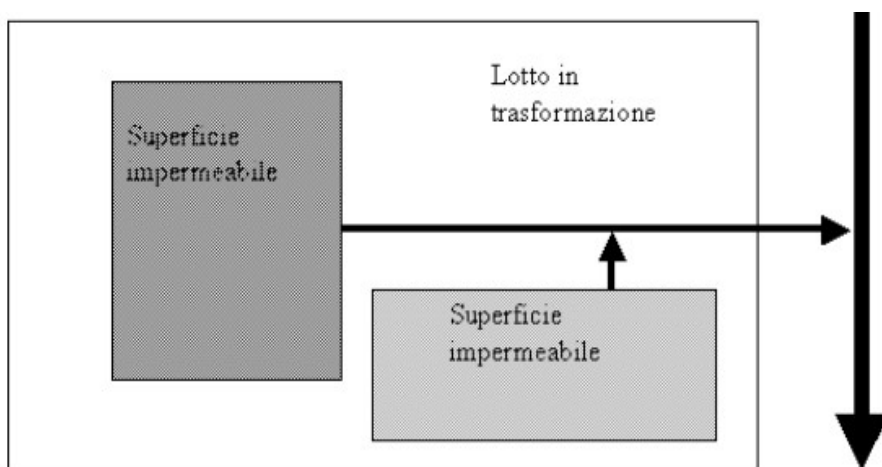
b) invaso o depressione in terra posizionato a monte del punto di scarico;

c) “strozzatura” delle caditoie così da permettere l'invaso su strade e piazzali;

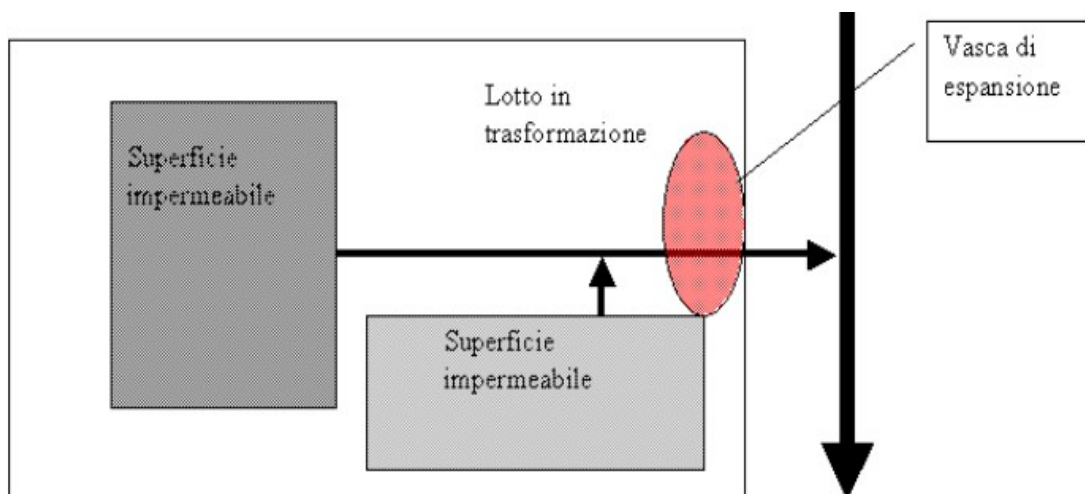
e) “strozzatura” delle grondaie e tetti piani con opportuno bordo così da permettere l'invaso sulle coperture;

f) sovradimensionamento delle fognature interne al lotto;

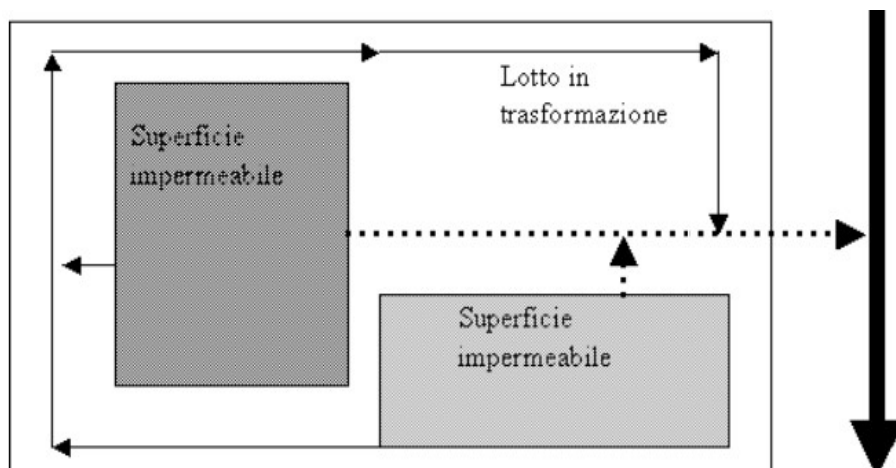
j) scarico a dispersione in terreni agricoli senza afflusso diretto alle reti di drenaggio.



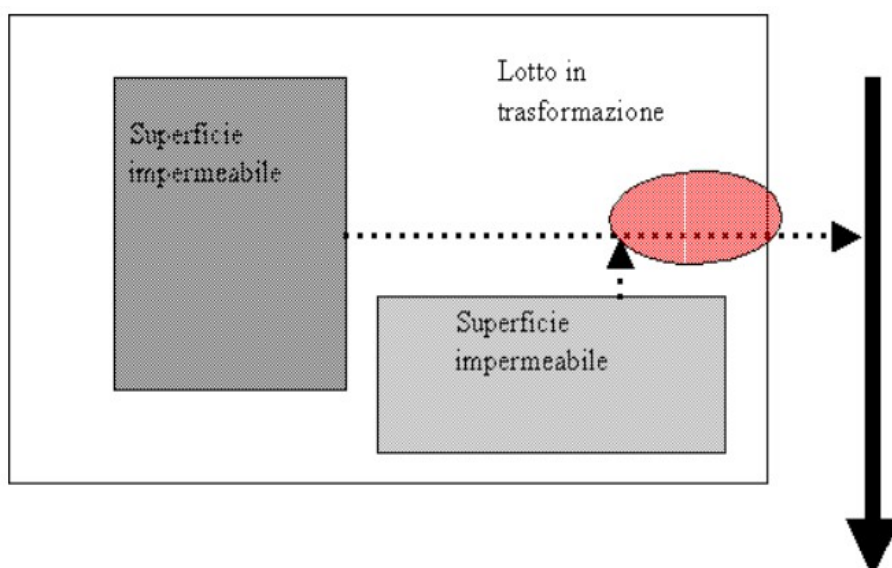
(Fig. 1.7a, Schema di drenaggio "tradizionale": le superfici impermeabili vengono drenate tramite sistemi di fognatura che recapitano al corpo idrico ricevente)



(Fig. 1.7b, Schema di drenaggio con dispositivo di invarianza costituito da una vasca di espansione posta a monte del punto di recapito)



(Fig. 1.7c, Schema di drenaggio con dispositivo di invarianza costituito da un sovradimensionamento della rete di fognatura, realizzando un percorso più lungo su cui le piene vengono laminate)



(Fig. 1.7d, Schema di drenaggio con dispositivo di invarianza ibrido
(sovradimensionamento fognatura + vasca di laminazione))

1.6 - Sistemi di gestione dei deflussi

Per la gestione sostenibile del deflusso urbano esistono una gran varietà di soluzioni, le quali principalmente si suddividono in opere di laminazione e di infiltrazione. In questo paragrafo vengono sinteticamente esposte alcune indicazioni di primo orientamento in merito alle strutture ed alle loro caratteristiche.

1.6.1 - Opere di laminazione

Le strutture di laminazione atte all'abbattimento delle portate pluviali e meteoriche entro determinati limiti rappresentano la famiglia più numerosa di tecniche di mitigazione degli allagamenti. Questi manufatti hanno la funzione di invasare provvisoriamente una parte, anche notevole, dei volumi idrici derivanti dagli eventi meteorici, per inviarli successivamente alla depurazione o per restituirli al ricettore finale, con portata ridotta e con essi compatibile. Sono classificabili tra le strutture di immagazzinamento anche quelle che non contemplano uno scarico verso valle ma lo svuotamento attraverso l'infiltrazione.

Le opere di laminazione si suddividono, in base alla funzione assolta, in opere di detenzione e di ritenzione.

Con le opere di detenzione tutti i deflussi o parte di essi vengono temporaneamente invasati e contemporaneamente rilasciati attraverso gli scarichi nel sistema di drenaggio di valle, con portata limitata al fine di ridurre la portata massima del deflusso e contribuire all'invarianza idraulica dell'area drenata. In questo caso il volume invasato è trattenuto solo per breve tempo nell'invaso e l'onda laminata

uscente da esso inizia a svilupparsi già durante lo stesso evento meteorico.

Con le opere di ritenzione, tutti i deflussi o parte di essi vengono invasati, generalmente per un lungo periodo, e non vengono rilasciati durante l'evento meteorico nel ricettore in quanto le acque accumulate vengono smaltite mediante infiltrazione, evaporazione o riuso. In questo caso quindi il volume invasato è trattenuto a lungo o permanentemente nell'invaso e l'eventuale scarico si sviluppa dopo l'evento meteorico, senza contribuire alla formazione della piena a valle.

Queste opere possono anche essere definite in base al posizionamento rispetto la rete drenante , che può essere in linea (invasi di transito) o fuori linea (invasi di cattura).

Nel primo caso tutti i deflussi derivanti dall'area scolante entrano direttamente nell'invaso e contemporaneamente escono dallo stesso passando attraverso una o più bocche di scarico limitanti la portata consegnata a valle.

Nel secondo caso, l'invaso è posto in derivazione rispetto al condotto o canale convogliante i deflussi derivanti dall'area scolante e viene interessato solo per portate in arrivo maggiori di un valore di soglia prefissato.

Infine, le opere di laminazione si possono differenziare per la loro posizione rispetto al piano campagna, e vengono definite sotterranee nel caso di serbatoi chiusi e posizionati al di sotto del piano campagna, o superficiali qualora interessino aree aperte già esistenti o adattate o appositamente sbancate per la laminazione, visibili dall'esterno e almeno in parte destinabili ad altre finalità (agricoltura, fruizione pubblica, paesaggio, ecc.) nei periodi di asciutta.

Di seguito delle tipologie di opere di laminazione (Fig. 1.8):



(Fig. 1.8a, vasca di laminazione sotterranea prefabbricata in cemento armato)



(Fig. 1.8b, esempio di bacino di ritenzione)

1.6.1.1 – Rain Barrel

Il rain barrel (Fig 1.9), o "barile per la pioggia", è una tipologia di opere di laminazione utilizzate a livello di edificio per la raccolta ed il riuso delle acque meteoriche che cadono sulla copertura impermeabile. Dovendo raccogliere piccole quantità d'acqua, la pressione idrostatica è ridotta, il che rende la plastica un ottimo materiale per via della sua leggerezza ed economicità. Sono inoltre di piccole dimensioni, facilmente trasportabili ed installabili.

L'acqua raccolta può essere riutilizzata per irrigare i giardini o piante all'interno dell'edificio, risparmiando acqua e denaro. E' da tener conto che l'acqua piovana può raccogliere inquinanti e batteri quando scorre su una copertura, per cui è da considerarsi non potabile e andrebbe da evitarne l'utilizzo su specie vegetali destinate al consumo.



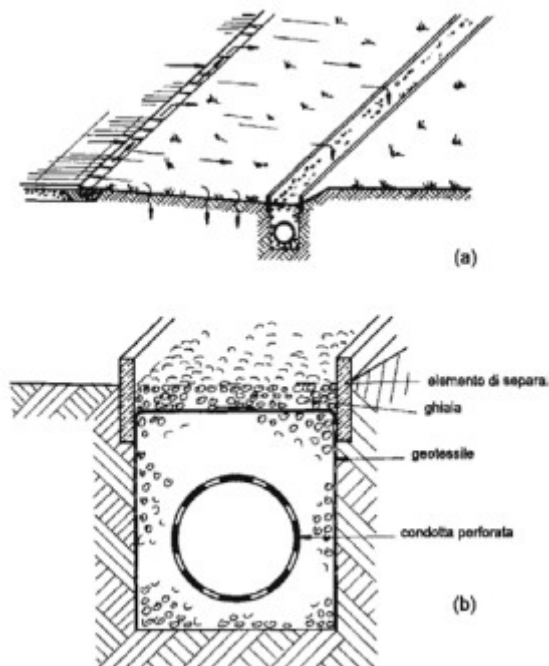
(Fig. 1.9, Esempio di rain barrel: la grondaia scarica l'acqua direttamente nel barile, che può essere successivamente estratta tramite una valvola posta nella parte inferiore)

1.6.2 - Opere di infiltrazione

Questa tipologia di soluzioni si differenzia dalle precedenti opere per lo svuotamento dei volumi idrici immagazzinati attraverso l'infiltrazione. Ciò solitamente richiede tempi più lunghi, che in particolar modo dipendono dalle caratteristiche del terreno attraverso cui l'acqua si infiltra. Generalmente queste soluzioni prevedono anche degli scarichi di troppo pieno per allontanare l'acqua in eccesso, qualora l'infiltrazione non avvenga in tempi sufficientemente rapidi.

1.6.2.1 - Trincea d'infiltrazione

Con trincea d'infiltrazione si intende uno scavo lungo e profondo riempito con materiale ad alta conduttività idraulica come la ghiaia (Fig. 1.10). La trincea viene generalmente costruita in corrispondenza di una cunetta ribassata rispetto al terreno da drenare, così che il deflusso superficiale si possa accumulare temporaneamente all'interno della trincea e gradualmente infiltrarsi nel terreno circostante attraverso le superfici laterali e il fondo. Ogni trincea viene generalmente dotata di una condotta forata centrale, che ha la funzione di distribuire omogeneamente le acque lungo tutta la trincea e, ove previsto, di condurre le acque non infiltrate alla rete di scarico. Attraverso tale condotta è pure possibile operare interventi di pulizia o manutenzione straordinaria della trincea stessa. Le trincee possono essere allocate in superficie o nel sottosuolo: quelle in superficie ricevono il deflusso superficiale direttamente dalle aree adiacenti mentre quelle nel sottosuolo possono ricevere il deflusso da altre reti drenanti, ma richiedono l'utilizzo di ulteriori pre-trattamenti per impedire che particolato grossolano, terreno e foglie occludano la struttura.



(Fig 1.10, sezione di una tipica trincea d'infiltrazione)

In superficie una trincea può opzionalmente avere uno strato di terreno per la crescita della vegetazione, la quale oltre a garantire l'aspetto estetico permette la rimozione dei nutrienti, la fitodepurazione delle acque e migliora la permeabilità del suolo. Uno strato sabbioso può inoltre essere posto prima dello strato di accumulo, per il filtraggio dell'acqua.

Tra i vantaggi delle trincee vi sono la possibilità di essere posizionate al di sotto della superficie del terreno (installazione sotto le zone di parcheggio) e la richiesta di spazi ridotti, fatto che le rende idonee alle zone urbane.

1.6.2.2 - Pavimentazione permeabile

Le pavimentazioni permeabili sono una valida alternativa ai convenzionali lastricati di marciapiedi o zone pedonali che si propone di aumentare la permeabilità delle superfici e, conseguentemente, di minimizzare il deflusso superficiale. Esistono due tipi di pavimentazioni permeabili: continue e discontinue.

Le pavimentazioni permeabili continue (Fig. 1.11) sono realizzate in modo apparentemente simile alle pavimentazioni stradali normali, ma con conglomerati bituminosi o calcestruzzi permeabili, ottenuti eliminando dalla miscela la sabbia e gli altri inerti di granulometria fine. Le pavimentazioni permeabili discontinue sono invece ottenute accostando elementi prefabbricati in CLS, perforati e autobloccanti. In entrambi i casi al di sotto della pavimentazione si realizza un sottofondo filtrante, composto da strati di granulometria crescente (Fig. 1.12).



(Fig 1.11, Differenza tra asfalto tradizionale ed asfalto poroso)

Le pavimentazioni permeabili discontinue presentano rispetto alle continue dei vantaggi nella fase di ricostruzione per perdita di funzionalità. I mattoni o moduli permeabili sono rimossi, puliti e riutilizzati, riducendo così i costi di ricostruzione, invece l'asfalto è rimosso e non più utilizzabile. E' chiaro che una pavimentazione discontinua non è ideale per usi come la costruzione di strade, pertanto entrambe le opzioni rimangono valide in relazione agli usi.



(Fig. 1.12, Esempio di pavimentazione porosa discontinua)

1.6.2.3 - Pozzi d'infiltrazione

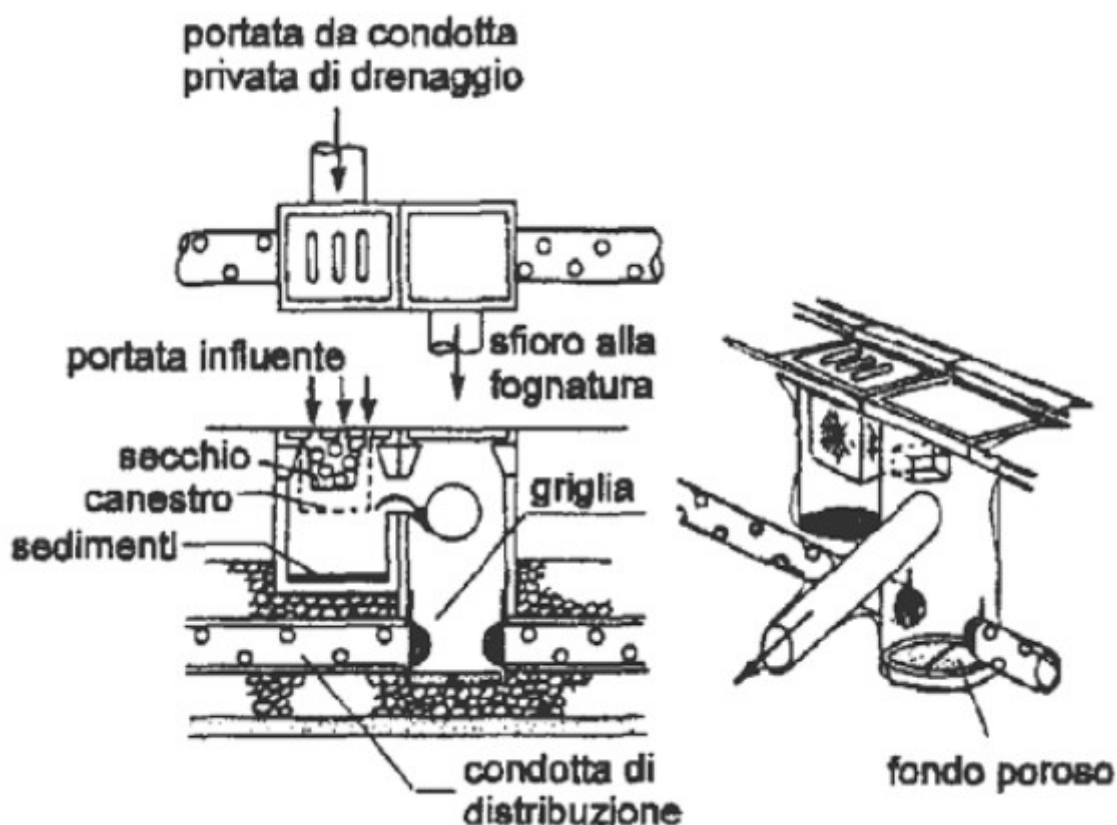
I pozzi di infiltrazione (Fig. 1.13) sono una variante delle trincee d'infiltrazione, sviluppandosi però in profondità e mantenendosi come interventi puntuali in superficie, e consentono che l'acqua piovana si infiltri nel sottosuolo in modo concentrato. In questo modo lo spazio occupato è ridotto, e ciò la rende una soluzione particolarmente adatta per centri abitati con una superficie libera limitata, ma anche nei casi in cui l'indagine geologica individui strati di terreno in profondità più permeabili di quelli superficiali.



(Fig 1.13, Esempio di pozzo perdente per il drenaggio delle acque meteoriche:
i fori sulle pareti permettono all'acqua di filtrare nel terreno circostante)

1.6.2.4 - Caditoie filtranti

Attraverso l'utilizzo delle caditoie filtranti (Fig. 1.14) si cerca di facilitare l'infiltrazione nel suolo delle acque di origine meteorica che si raccolgono sui tetti o sulle superfici stradali. Le acque accumulate lungo le cunette stradali sono scaricate in caditoie munite di una prima camera finalizzata alla separazione dei solidi grossolani (foglie e inerti); successivamente, le acque passano in una seconda camera, munita di fondo drenante, da cui si diparte la trincea drenante. L'ingresso in questa è protetto da una griglia, al fine di evitare pericoli di occlusione; anche in questo caso, un tubo centrale consente l'avvio delle acque in fognatura, qualora venga superata la capacità d'infiltrazione del sistema, evitando così il pericolo di allagamenti superficiali.



(Fig. 1.14, Schema di una tipica caditoia filtrante)

1.6.2.5 - Bacini e vasche d'infiltrazione

Le vasche e i bacini d'infiltrazione sono invasi a fondo permeabile. I primi hanno generalmente i muri di contenimento in calcestruzzo e possono essere strutture anche sotterranee, mentre i secondi sono ricavati da depressioni naturali o artificiali nel terreno, quindi sempre a cielo aperto. In entrambi i casi è indispensabile la formazione di una capacità di accumulo, come volano tra l'idrogramma di piena in arrivo e il regime delle portate infiltrate. Nei bacini d'infiltrazione, in genere le pareti e il fondo del bacino sono ricoperte da un tappeto erboso, al fine sia di stabilizzare queste aree sia di esercitare un'azione filtrante per rimuovere le sostanze inquinanti presenti nelle acque di pioggia, come nutrienti e metalli disciolti. Inoltre, le radici

vegetali possono aumentare la capacità di infiltrazione di un terreno poiché creano nello stesso dei condotti preferenziali in cui l'acqua si infiltra.

1.6.3 - Tetti verdi

I tetti verdi (Fig. 1.7) non sono propriamente classificate tra le opere di laminazione ne di infiltrazione, seppur il loro funzionamento preveda comunque delle similarità con entrambe le categorie. Questa tipologia di soluzioni mira a sostituire le coperture, le quali sono tra le principali componenti dell'area urbana impermeabilizzata, con una superficie comparabile ad un terreno naturale.



(Fig. 1.15, Esempio di tetto e pareti verdi)

Le acque meteoriche vengono quindi assorbite dal tetto giardino, che tramite ritenzione e detenzione, contribuisce a ridurre gli afflussi ai sistemi di drenaggio. La vegetazione inoltre svolge un ruolo filtrante e di riduzione delle temperature attraverso l'evapotraspirazione e l'assorbimento della radiazione solare incidente.

CAPITOLO 2

2.1 – Descrizione dello studio

Il secondo capitolo si propone di analizzare quattro diversi sistemi di gestione dei deflussi urbani (LID), al fine di valutarne qualitativamente il comportamento al variare delle caratteristiche del bacino e quantitativamente il contributo all'invarianza idraulica. I quattro LID scelti per quest'analisi sono la trincea d'infiltrazione, il tetto giardino, l'asfalto poroso e la vasca di laminazione. L'analisi viene svolta tramite il software EPA SWMM, mentre i dati vengono elaborati in seguito su fogli elettronici.

Il comportamento e le prestazioni dei LID sono fortemente influenzate dal luogo in cui vengono posti, ed al fine di poter dare carattere generale a questo studio, sono necessari diversi scenari in cui svolgere simulazioni, e successivamente compararne i risultati. Ogni scenario è caratterizzato dall'insieme delle caratteristiche del bacino idrografico e della pioggia che agisce su di esso: alcune di questi parametri saranno comuni a tutti gli scenari, altri varieranno, generando combinazioni in cui svolgere l'analisi.

Le caratteristiche variabili scelte hanno un ruolo importante nella creazione di deflusso, il che influenza significativamente il comportamento e le prestazioni di un LID. Il deflusso dipende, in particolar modo, da ciò che inserisce acqua nel sistema (precipitazioni) e ciò che le impedisce di uscire (impermeabilizzazione). Si cerca, con la scelta dei valori parametrici, di rappresentare un ampio spettro di possibili situazioni.

2.1.1 – Parametri generali

La costruzione del bacino di riferimento preso come modello per lo studio parte dal dimensionamento della superficie, che viene presa unitaria pari ad un ettaro (10000m²). La scelta del valore è puramente convenzionale e non ha alcun impatto sui risultati dell'analisi, che hanno carattere relativo poichè valutano le differenze prestazionali dei LID.

Successivamente, vengono scelti i parametri variabili per la generazione delle combinazioni sono tre: tipologia di terreno naturale del bacino, percentuale di superficie impermeabilizzata ed intensità di pioggia.

Le tipologie di terreno scelto sono "sabbioso", "loam" (40% sabbie, 40% limi, e 20% argille) e "argilloso", ed andranno a caratterizzare la porzione permeabile del bacino, definendone le sue capacità di infiltrare e trattenere parte del deflusso.

Le possibili percentuali di superficie impermeabilizzata sono scelti pari a 10%, 40%, 70% e 100% dell'area totale del bacino. Questa porzione del bacino non avrà alcuna capacità di infiltrare o trattenere acqua, la quale potrà solo accumularsi o scorrere altrove.

E' importante sottolineare come un bacino non urbanizzato, realisticamente, non ha mai una percentuale di impermeabilizzazione pari a zero, per via di infrastrutture comunque presenti in aree non urbanizzate o a causa di superfici impermeabili naturali. La percentuale di impermeabilizzazione del 10%, seppur convenzionale, appare ragionevole per rappresentare un bacino pre-costruzione, e viene scelta di

conseguenza per rappresentare l'obiettivo di raggiungimento dell'invarianza idraulica, e sarà il punto rispetto al quale verranno valutate le variazioni di deflusso.

Infine, il terzo parametro variabile per la definizione degli scenari oggetto di studio è l'intensità di pioggia, assunta costante, e alla quale vengono assegnati valori pari a 50, 100, e 150mm/h. Immaginando tempi di ritorno relativamente contenuti, la durata dell'evento piovoso viene fissato pari a 20 minuti.

2.1.2 - Combinazioni di scenari

Si procede combinando le 3 tipologie di terreno, le 4 percentuali di impermeabilizzazione e le 3 intensità di pioggia, in modo da generare 36 possibili scenari. Ciò va poi ripetuto per ognuno dei 4 LID e per il bacino senza LID, portando alla creazione di 180 possibili scenari, i quali vengono identificati tramite la nomenclatura:

[Lettera1][Numero1]_[Numero2][Lettera2]

con Lettera1 = S, L o A rispettivamente per bacini sabbiosi, loam o argilosi;

con Numero1 = 50, 100 o 150 per identificare l'intensità di pioggia;

con Numero2 = 10, 40, 70 o 100 per indicare la percentuale di superficie del bacino impermeabilizzata;

con Lettera2 = T, G, P, V per specificare l'utilizzo rispettivamente della trincea d'infiltrazione, del tetto giardino, dell'asfalto poroso o della vasca di laminazione.

Ad esempio, un bacino con il 40% di superficie impermeabilizzata, con terreno argilloso, con il tetto giardino e soggetto ad un'intensità di pioggia pari a 150mm/h, verrà indicato come A150_40G.

Sono inoltre state utilizzati scenari con lo 0% di impermeabilizzazione per il bacino senza LID, in modo da poter creare i relativi idrogrammi nella loro interezza. Il risultato finale è come segue (Tab 2.1):

Intensità di pioggia (mm/h)	Terreno	Senza LID				
		Superficie Impermeabile (%)				
		0	10	40	70	100
50	Sabbia	S50_0	S50_10	S50_40	S50_70	S50_100
	Loam	L50_0	L50_10	L50_40	L50_70	L50_100
	Argilla	A50_0	A50_10	A50_40	A50_70	A50_100
100	Sabbia	S100_0	S100_10	S100_40	S100_70	S100_100
	Loam	L100_0	L100_10	L100_40	L100_70	L100_100
	Argilla	A100_0	A100_10	A100_40	A100_70	A100_100
150	Sabbia	S150_0	S150_10	S150_40	S150_70	S150_100
	Loam	L150_0	L150_10	L150_40	L150_70	L150_100
	Argilla	A150_0	A150_10	A150_40	A150_70	A150_100

(Tab 2.1a, Combinazioni di scenari per il bacino senza LID)

Intensità di pioggia (mm/h)	Terreno	Trincea d'infiltrazione			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	S50_10T	S50_40T	S50_70T	S50_100T
	Loam	L50_10T	L50_40T	L50_70T	L50_100T
	Argilla	A50_10T	A50_40T	A50_70T	A50_100T
100	Sabbia	S100_10T	S100_40T	S100_70T	S100_100T
	Loam	L100_10T	L100_40T	L100_70T	L100_100T
	Argilla	A100_10T	A100_40T	A100_70T	A100_100T
150	Sabbia	S150_10T	S150_40T	S150_70T	S150_100T
	Loam	L150_10T	L150_40T	L150_70T	L150_100T
	Argilla	A150_10T	A150_40T	A150_70T	A150_100T

(Tab 2.1b, Combinazioni di scenari per il bacino con la trincea d'infiltrazione)

Intensità di pioggia (mm/h)	Terreno	Asfalto Poroso			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	S50_10P	S50_40P	S50_70P	S50_100P
	Loam	L50_10P	L50_40P	L50_70P	L50_100P
	Argilla	A50_10P	A50_40P	A50_70P	A50_100P
100	Sabbia	S100_10P	S100_40P	S100_70P	S100_100P
	Loam	L100_10P	L100_40P	L100_70P	L100_100P
	Argilla	A100_10P	A100_40P	A100_70P	A100_100P
150	Sabbia	S150_10P	S150_40P	S150_70P	S150_100P
	Loam	L150_10P	L150_40P	L150_70P	L150_100P
	Argilla	A150_10P	A150_40P	A150_70P	A150_100P

(Tab 2.1c, Combinazioni di scenari per il bacino con l'asfalto poroso)

Intensità di pioggia (mm/h)	Terreno	Tetto Giardino			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	S50_10G	S50_40G	S50_70G	S50_100G
	Loam	L50_10G	L50_40G	L50_70G	L50_100G
	Argilla	A50_10G	A50_40G	A50_70G	A50_100G
100	Sabbia	S100_10G	S100_40G	S100_70G	S100_100G
	Loam	L100_10G	L100_40G	L100_70G	L100_100G
	Argilla	A100_10G	A100_40G	A100_70G	A100_100G
150	Sabbia	S150_10G	S150_40G	S150_70G	S150_100G
	Loam	L150_10G	L150_40G	L150_70G	L150_100G
	Argilla	A150_10G	A150_40G	A150_70G	A150_100G

(Tab 2.1d, Combinazioni di scenari per il bacino con il tetto giardino)

Intensità di pioggia (mm/h)	Terreno	Vasca di Laminazione			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	S50_10V	S50_40V	S50_70V	S50_100V
	Loam	L50_10V	L50_40V	L50_70V	L50_100V
	Argilla	A50_10V	A50_40V	A50_70V	A50_100V
100	Sabbia	S100_10V	S100_40V	S100_70V	S100_100V
	Loam	L100_10V	L100_40V	L100_70V	L100_100V
	Argilla	A100_10V	A100_40V	A100_70V	A100_100V
150	Sabbia	S150_10V	S150_40V	S150_70V	S150_100V
	Loam	L150_10V	L150_40V	L150_70V	L150_100V
	Argilla	A150_10V	A150_40V	A150_70V	A150_100V

(Tab 2.1e, Combinazioni di scenari per il bacino con il tetto giardino)

2.2 - Storm Water Management Model (SWMM)

Uno degli strumenti che l'EPA mette a disposizione dei professionisti e che è stato utilizzato per lo svolgimento dell'analisi tecnica dei LID nel presente studio, è l'EPA's Storm Water Management Model (SWMM). Il programma permette di modellare e simulare sistemi di precipitazione e deflusso, sia per eventi singoli che di lungo periodo, valutando le acque sia quantitativamente che qualitativamente.

Lo SWMM opera tramite un'insieme di "subcatchment", o sottobacini, che ricevono precipitazione per poi generare deflusso e carichi inquinanti. Le connessioni tra i bacini per il trasporto d'acqua vengono modellate tramite sistemi di tubi, canali, sistemi di immagazzinamento, sistemi di trattamento ed altri dispositivi. Lo SWMM traccia la quantità e la qualità del deflusso generato all'interno di ogni subcatchment, mentre in ogni tubo valuta la velocità, la profondità e la qualità dell'acqua. Ciò viene simulato nel periodo di tempo specificato, ad intervalli regolari.

SWMM è stato inizialmente sviluppato nel 1971 ed è stato costantemente migliorato nel tempo. Esso continua ad essere ampiamente usato in tutto il mondo per la pianificazione, l'analisi e la progettazione legata al deflusso causato da acque meteoriche, fognature ed altri sistemi di drenaggio in particolare nelle aree urbane.

Il software fornisce un ambiente integrato per l'impostazione dei dati dell'area di studio, la possibilità di svolgere simulazioni idrologiche, idrauliche e di qualità dell'acqua e la consultazione dei risultati in una varietà di formati.

La versione 5.1 di SWMM, utilizzata nell'analisi, è stata sviluppata dalla "Water Supply and Water Resources Division" del "National Risk Management Research

Laboratory" dell' EPA, con la consulenza della compagnia di ingegneria CDM-Smith.

2.2.1 - Modellazione

SWMM permette di modellare e tener conto di vari processi idrologici che producono deflusso in aree urbane. Tra questi ci sono le precipitazioni variabili nel tempo, l'evaporazione da superfici d'acqua, l'accumulazione e scioglimento della neve, l'infiltrazione delle acque meteoriche in terreni non saturi e la cattura e ritenzione della pioggia e del deflusso tramite l'utilizzo di diverse tipologie di LID.

Per tener conto della variabilità spaziale, l'area di studio può essere divisa in un'insieme di piccoli sottobacini, ognuno con le proprie caratteristiche. Essi possono poi essere connessi tra loro per il trasporto dell'acqua che scorre superficialmente o all'interno di condotte. Queste ultime vengono fornite dal software in una varietà di formati con associati vari parametri che ne permettono ulteriormente la personalizzazione.

SWMM permette inoltre di:

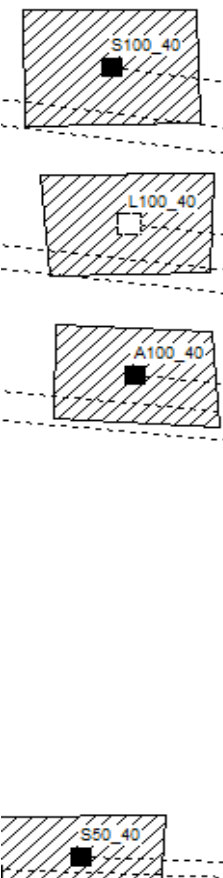
- gestire reti di dimensione infinita
- modellare elementi speciali come unità di immagazzinamento e trattamento, pompe, valvole divisorie ed definire delle regole di controllo dinamico personalizzate.
- utilizzare la metodologia dell'onda cinematica o dell'onda dinamica.
- stimare la produzione dei carichi inquinanti associati al deflusso.

2.3 - Impostazione degli scenari

Vengono di seguito descritti i processi ed i valori utilizzati per la definizione degli scenari oggetti di studio nell'ambiente integrato di modellazione SWMM.

2.3.1 - Parametri generali del bacino di riferimento

La creazione dei bacini di riferimento avviene attraverso lo strumento "subcatchment", sul quale vanno specificate le caratteristiche che meglio lo rappresentano (Fig 2.1).



Property	Value
Y-Coordinate	5761.478
Description	
Tag	
Rain Gage	100
Outlet	Out
Area	1
Width	100
% Slope	3
% Imperv	40
N-Imperv	0.011
N-Perv	0.13
Dstore-Imperv	1.905
Dstore-Perv	3.81
%Zero-Imperv	0
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration Data	HORTON
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0

(Fig 2.1, Parametri generali del bacino L100_40 e relativi valori)

Il parametro "Width", ovvero la larghezza del bacino, è un parametro di calibrazione del modello che può essere scelto in modo da far coincidere gli idrogrammi osservati e calcolati. Uno degli approcci che tenta di dare un significato fisico a questo valore, lo definisce come il rapporto fra la superficie del bacino e la lunghezza media del massimo percorso che il deflusso può compiere prima di generare ruscellamento.

La lunghezza di questo percorso è fortemente variabile in funzione delle reali caratteristiche del bacino, tra le quali la morfologia del terreno, la quantità e la distribuzione dell'impermeabilizzazione. Poichè lo studio utilizza dei modelli e non dei bacini reali, non si ha a disposizione questo dato, per cui sono state svolte simulazioni con diversi valori di Width e si è notato che non vi sono variazioni significative dell'idrogramma in uscita, perlomeno ai fini di questo studio. Per questo motivo, viene utilizzato convenzionalmente il valore di 100m, che è nello stesso ordine di grandezza di valori consigliati in letteratura e di quelli ottenibili applicando la metodologia descritta in precedenza.

La pendenza media del bacino sono state svolte delle simulazioni utilizzando valori tra l'1 ed il 5%, ed è stato riscontrato che l'entità del deflusso subisce variazioni inferiori all'1%, quindi non significative. Fatte queste considerazioni, è stato scelto il 3% come valore convenzionale.

Successivamente vengono fissati i valori della n di Manning, rappresentanti l'attrito tra superficie e deflusso, chiamati N_{Imperv} e N_{Perv} rispettivamente per la superficie impermeabile e permeabile. Nel primo caso viene ipotizzato l'asfalto liscio, con una n pari a 0.011, nel secondo al terreno naturale pari a 0.13. (McCuen, 1996).

I parametri Dstore-Imperv e Dstore-Perv rappresentano il valore medio nell'intervallo di profondità delle depressioni superficiali rispettivamente per aree impermeabili e permeabili. Vengono fissati pari a 1.905mm nel primo caso, 3.81mm nel secondo. (ASCE, 1992)

Infine, il parametro %Zero-Imperv rappresentante la percentuale di area impermeabile priva di depressioni superficiali viene posto pari a 0.

2.3.2 - Parametri del terreno

Il modello di infiltrazione scelto per i bacini è quello di Horton, il quale utilizza una formula empirica che assegna inizialmente all'infiltrazione una velocità costante f_0 , che decresce esponenzialmente nel tempo t , fino a raggiungere il valore f_c quando il terreno raggiunge un livello di saturazione sufficiente:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

k è la costante di decadimento ed è specifica per ogni terreno.

I terreni oggetto della simulazione vengono classificati in modo univoco tramite gli Hydrologic Soil Groups (HSG) definiti inizialmente dall'SCS (Soil Conservation Service), agenzia del dipartimento dell'agricoltura degli Stati Uniti, ad oggi sostituita dall'NRCS (National Resources Conservation Service):

tipo di terreno	f_0 [mm/h]	f_∞ [mm/h]	k [h ⁻¹]
A) Terreno con scarsa potenzialità di deflusso. Comprende forti spessori di sabbie con scarsissimo limo e argilla; anche forti spessori di ghiaie profonde, molto permeabili	250	25.4	2
B) Terreno con potenzialità di deflusso moderatamente bassa Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione.	200	12.7	2
C) Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.	125	6.3	2
D) Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressochè impermeabili in vicinanza della superficie.	76	2.5	2

(Tab. 2.2, Classificazione dei terreni e relativi valori di Horton)

Vengono utilizzate le categorie B, C e D per rappresentare rispettivamente terreni sabbiosi, loam e argillosi. I valori in tabella (SCS, 1956), vengono utilizzati per compilare il modello di infiltrazione di Horton per ogni bacino all'interno di SWMM.

Infiltration Editor

Infiltration Method: **HORTON**

Property	Value
Max. Infil. Rate	125
Min. Infil. Rate	6.3
Decay Constant	2
Drying Time	7
Max. Volume	0

Maximum rate on the Horton infiltration curve (in/hr or mm/hr)

OK Cancel Help

(Fig 2.2, Editor SWMM per i parametri d'infiltrazione di Horton)

2.3.1 - Precipitazioni

L'impostazione delle precipitazioni in SWMM parte dal "Rain Gage", ovvero un pluviometro, che viene utilizzato per rappresentare un evento meteorico (Fig 2.3). Ogni bacino va associato ad un singolo Rain Gage, dal quale trae le informazioni relative alla precipitazione a cui è soggetto.



Rain Gage 100	
Property	Value
Description	
Tag	
Rain Format	INTENSITY
Time Interval	0:01
Snow Catch Factor	1.0
Data Source	TIMESERIES
TIME SERIES:	
- Series Name	TS100
DATA FILE:	
- File Name	*
- Station ID	*

(Fig. 2.3, Parametri per il Rain Gage con intensità di pioggia pari a 100mm/h)

Sono quindi stati creati tre Rain Gage per rappresentare le tre intensità di pioggia di 50, 100 e 150 mm/h. Con tutti, viene selezionato il rain format "INTENSITY" per imporre l'intensità di pioggia come dato da misurare ed un intervallo di tempo tra una misurazione e l'altra di 1 minuto. Vanno poi associati i dati della precipitazione al Rain Gage, che in questo caso viene fatto tramite "Time Series", o serie temporali.

Tramite esse viene inserito il valore dell'intensità di pioggia ed associato al tempo

(Fig. 2.4a). Seppur in questa analisi l'intensità della pioggia viene mantenuta costante, la serie temporale viene comunque costruita ad intervalli di un minuto, fino alla conclusione della precipitazione che dura, come specificato precedentemente, 20 minuti (Fig 2.4b). Questo viene fatto per dare al software dei punti nel tempo in cui svolgere le simulazioni e produrre risultati, in modo da poter successivamente costruire una curva sufficientemente accurata per rappresentare l'evoluzione del deflusso nel tempo.

Time Series Editor

Time Series Name
TS100

Description

☐ Use external data file named below

☒ Enter time series data in the table below
No dates means times are relative to start of simulation.

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
	0	100
	0:01	100
	0:02	100
	0:03	100
	0:04	100
	0:05	100
	0:06	100
	0:07	100
	0:08	100
	0:09	100
	0:10	100

View

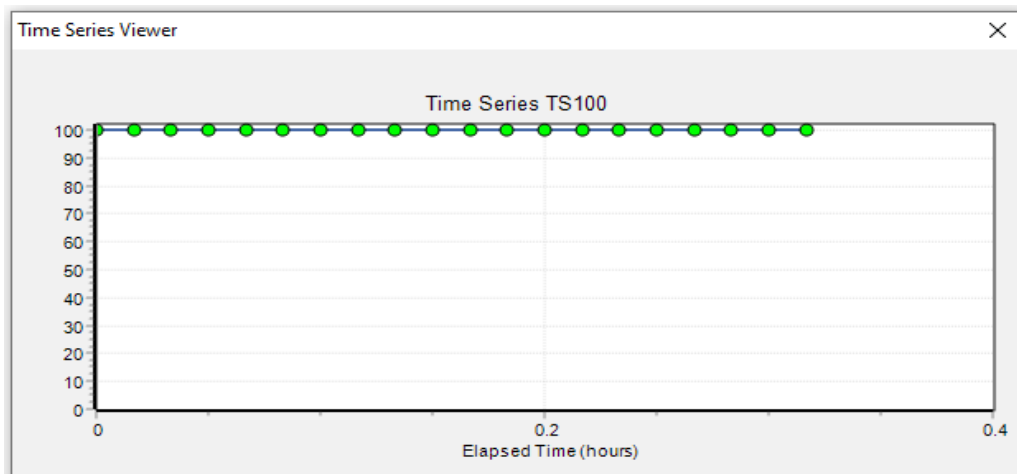
OK

Cancel

Help

(Fig. 2.4a, Editor SWMM per la costruzione della serie temporale TS100, con intensità di pioggia di 100mm/h)

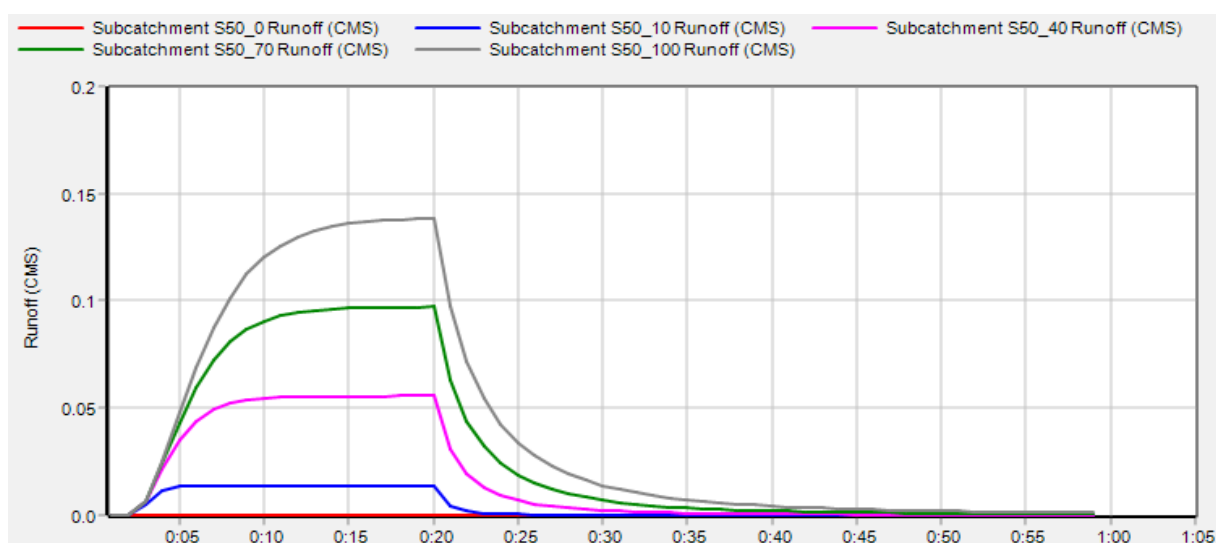
Per l'impostazione dei punti va specificato il tempo di inizio dell'intervallo, e poichè sono 20, devono necessariamente partire dal tempo zero fino al tempo 0:19.



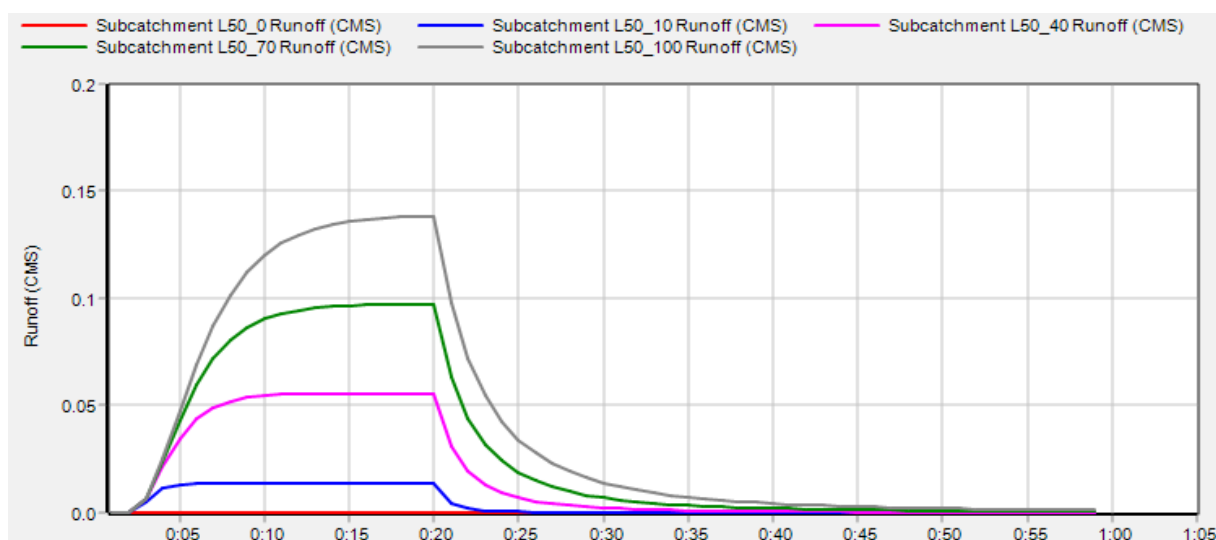
(Fig 2.4b, grafico per la serie temporale TS100)

2.4 – Risposta del bacino

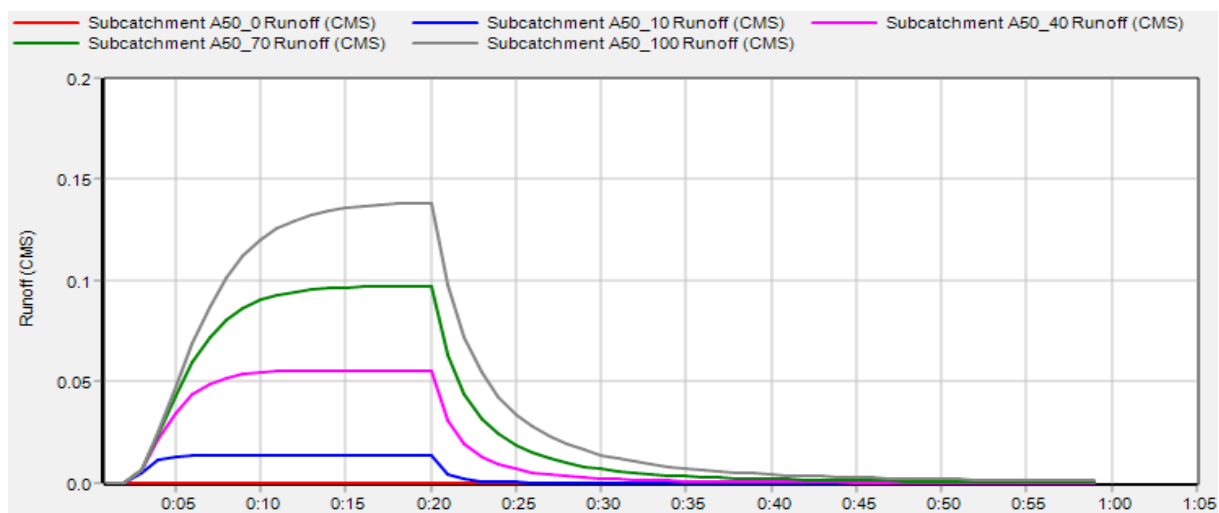
In questo paragrafo vengono studiati gli scenari privi di sistemi di gestione dei deflussi, in modo da disporre di adeguati termini di raffronto per le valutazioni successive relative all'invarianza idraulica. Di seguito (Fig. 2.5) vengono riportati gli idrogrammi tramite cui si può osservare la variazione di deflusso nel tempo ed al variare della percentuale di superficie impermeabilizzata.



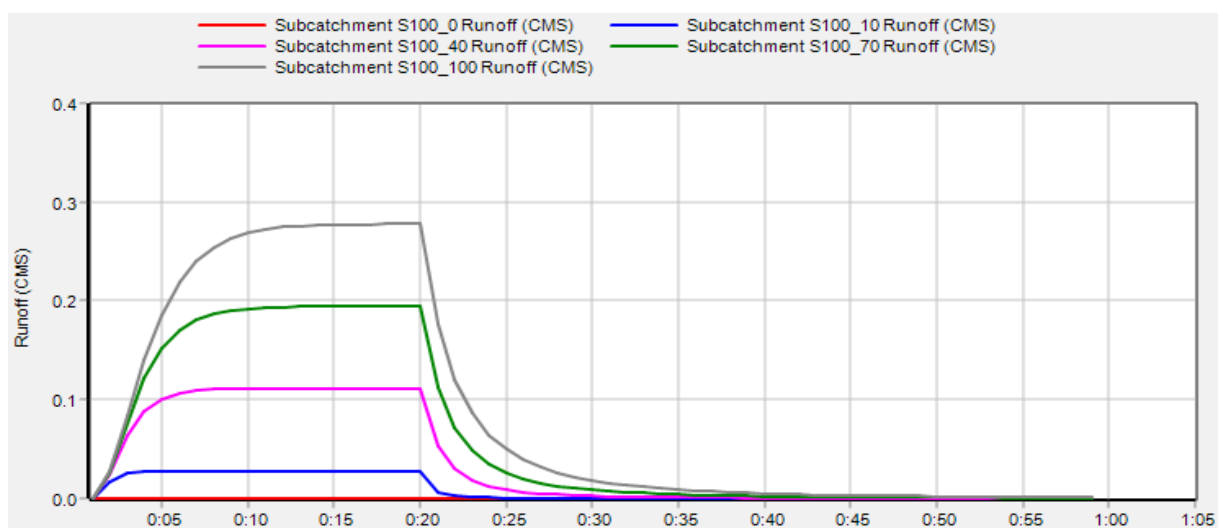
(Fig. 2.5a, idrogramma con terreno sabbioso ed intensità di pioggia di 50mm/h)



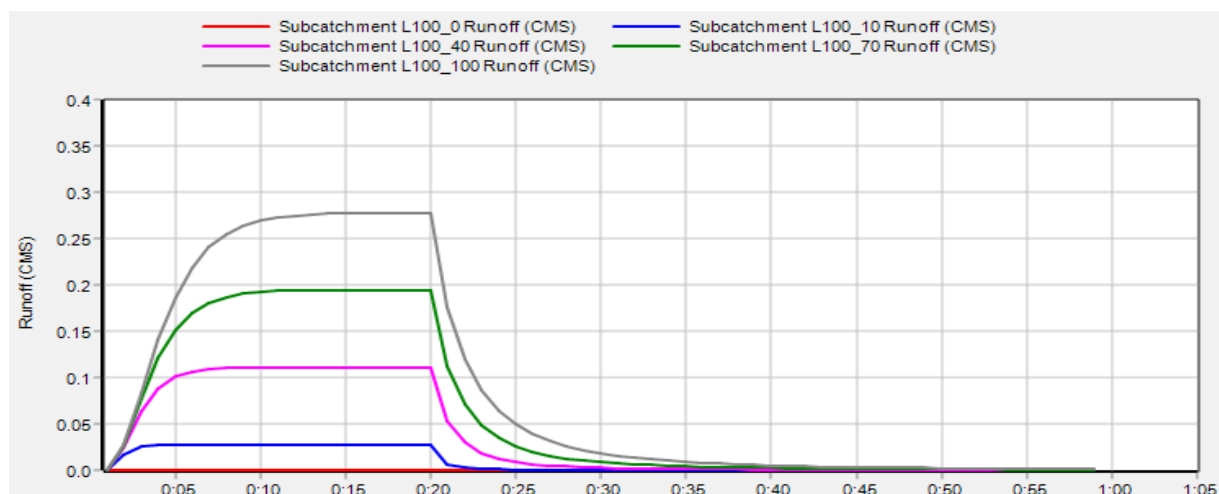
(Fig. 2.5b, idrogramma con terreno loam ed intensità di pioggia di 50mm/h)



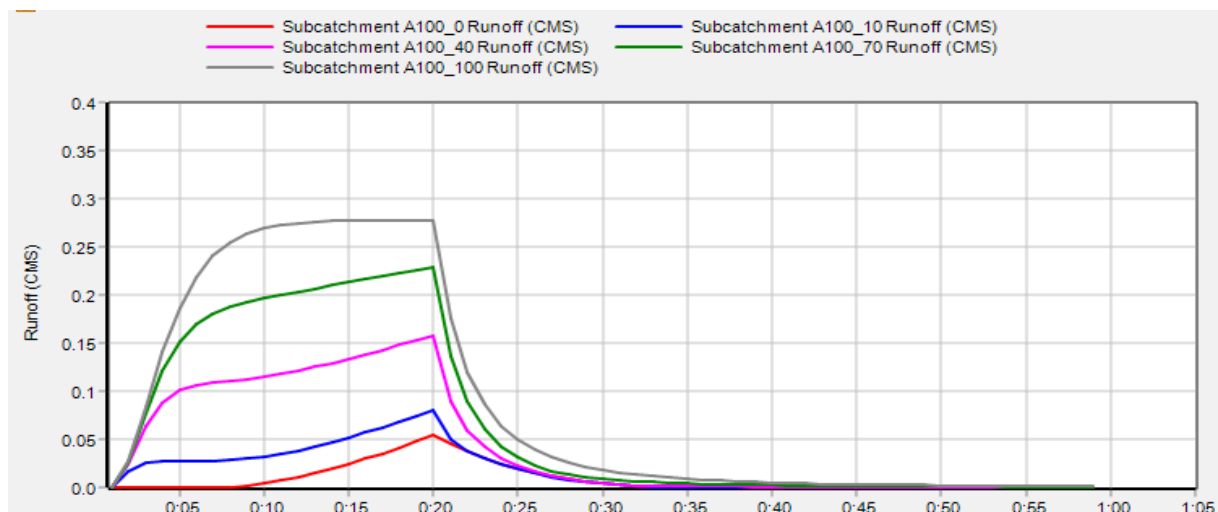
(Fig. 2.5c, idrogramma con terreno argilloso ed intensità di pioggia di 50mm/h)



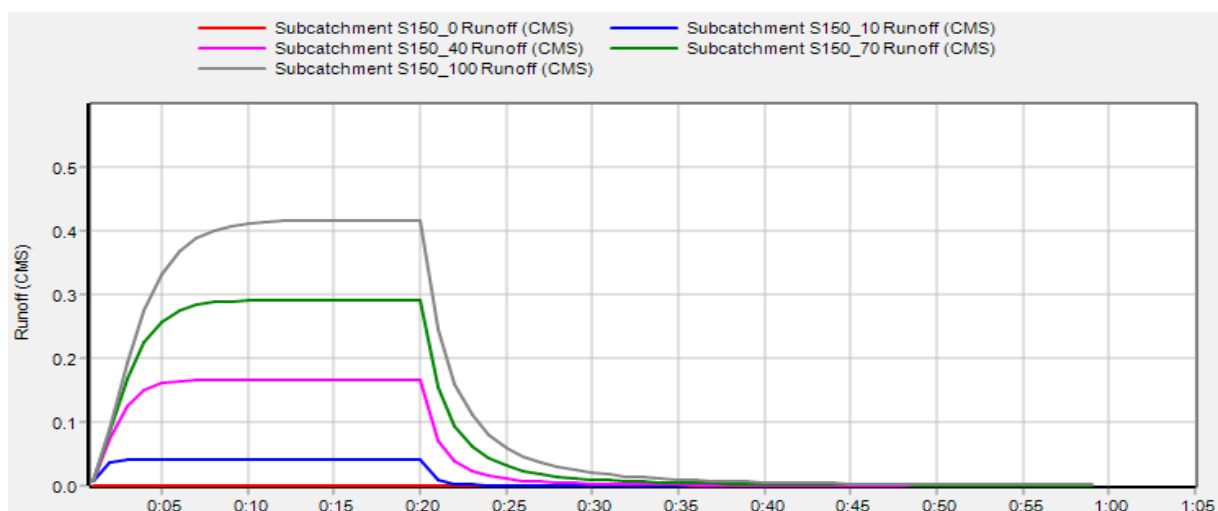
(Fig. 2.5d, idrogramma con terreno sabbioso ed intensità di pioggia di 100mm/h)



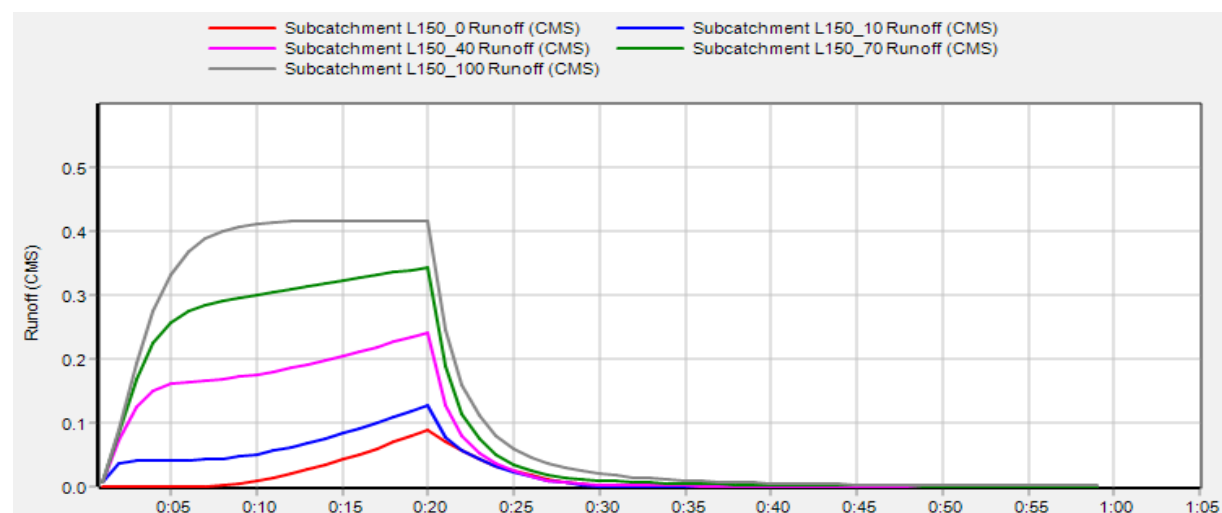
(Fig. 2.5e, idrogramma con terreno loam ed intensità di pioggia di 100mm/h)



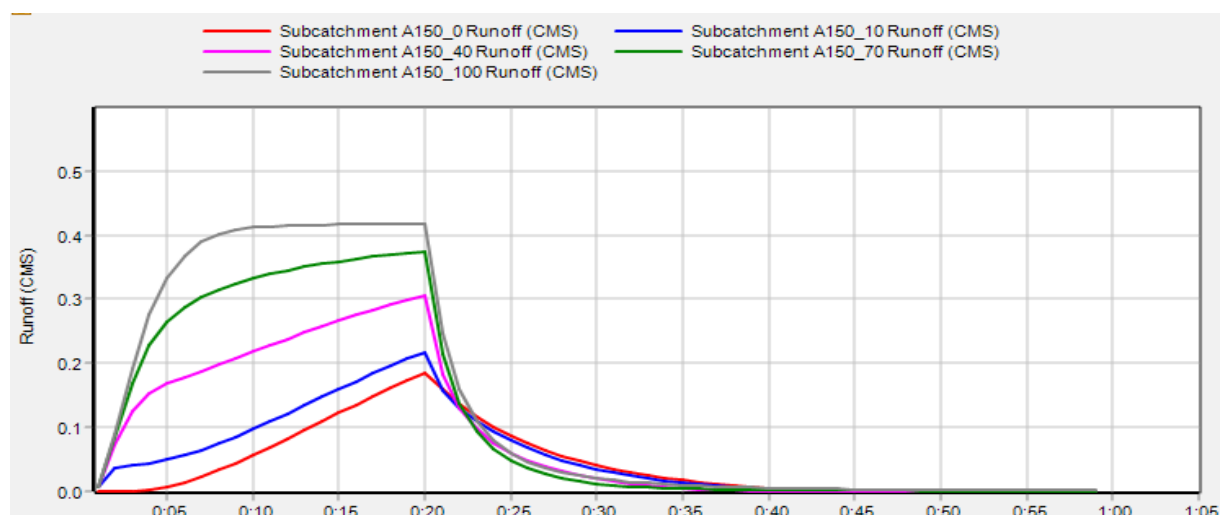
(Fig. 2.5f, idrogramma con terreno argilloso ed intensità di pioggia di 100mm/h)



(Fig. 2.5g, idrogramma con terreno sabbioso ed intensità di pioggia di 150mm/h)



(Fig. 2.5h, idrogramma con terreno loam ed intensità di pioggia di 150mm/h)



(Fig. 2.5i, idrogramma con terreno argilloso ed intensità di pioggia di 150mm/h)

I grafici mostrano come il deflusso cresca col passare del tempo, fino a raggiungere il picco nel momento in cui l'evento piovoso conclude, in corrispondenza del 20esimo minuto.

Si procede estraendo dagli idrogrammi i valori di portata al colmo Q_{max} ed il coefficiente udometrico U . Quest'ultimo viene calcolato dividendo il volume defluito dal bacino per la durata del deflusso e l'area del bacino (che però è unitaria), esprimendo il risultato in $l/(s \cdot ha)$. Si ottiene quindi (Tab. 2.3).

Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Q_{max} (m ³ /s)				
		Senza LID				
		Superficie Impermeabile (%)				
		0	10	40	70	100
50	Sabbia	0,00	0,01	0,06	0,10	0,14
	Loam	0,00	0,01	0,06	0,10	0,14
	Argilla	0,00	0,01	0,06	0,10	0,14
100	Sabbia	0,00	0,03	0,11	0,19	0,28
	Loam	0,00	0,03	0,11	0,19	0,28
	Argilla	0,05	0,08	0,16	0,23	0,28
150	Sabbia	0,00	0,04	0,17	0,29	0,42
	Loam	0,09	0,13	0,24	0,34	0,42
	Argilla	0,18	0,22	0,31	0,37	0,42

(Tab 2.3a, Valori della portata al colmo Q_{max} in assenza di LID)

Volume Totale Defluito (10 ⁶ litri)						
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Senza LID				
		Superficie Impermeabile (%)				
		0	10	40	70	100
50	Sabbia	0,0000	0,0149	0,0590	0,1027	0,1459
	Loam	0,0000	0,0149	0,0590	0,1027	0,1459
	Argilla	0,0000	0,0149	0,0590	0,1027	0,1459
100	Sabbia	0,0000	0,0317	0,1260	0,2197	0,3129
	Loam	0,0000	0,0317	0,1260	0,2197	0,3129
	Argilla	0,0301	0,0607	0,1504	0,2366	0,3129
150	Sabbia	0,0000	0,0484	0,1929	0,3367	0,4800
	Loam	0,0464	0,0930	0,2301	0,3620	0,4800
	Argilla	0,1519	0,1899	0,2990	0,3985	0,4800

(Tab 2.3b, Valori del volume totale defluito in assenza di LID;
viene utilizzato per il calcolo del coefficiente udometrico)

U (l/(s*ha))					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Senza LID			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	12,42	49,17	85,58	121,58
	Loam	12,42	49,17	85,58	121,58
	Argilla	12,42	49,17	85,58	121,58
100	Sabbia	26,42	105,00	183,08	260,75
	Loam	26,42	105,00	183,08	260,75
	Argilla	50,58	125,33	197,17	260,75
150	Sabbia	40,33	160,75	280,58	400,00
	Loam	77,50	191,75	301,67	400,00
	Argilla	158,25	249,17	332,08	400,00

(Tab 2.3c, Valori del coefficiente udometrico in assenza di LID)

Come spiegato precedentemente, il coefficiente udometrico corrispondente ad una superficie impermeabile del 10% viene considerato rappresentativo del deflusso in condizioni pre-costruzione. Evidenziato in rosso nella tabella (Tab. 2.3c) per ogni tipologia di terreno ed intensità di pioggia, viene utilizzato per il calcolo della (2.1):

$$\Delta U = (U - U_{10}) / U_{10} \quad (2.1)$$

in cui U è il coefficiente udometrico in una determinata condizione (funzione dello scenario) espresso in $l/(s \cdot h)$; U_{10} è il valore di riferimento per il coefficiente udometrico che rappresenta le condizioni pre-costruzione (con impermeabilizzazione del 10%).

ΔU è dunque un parametro che quantifica la variazione di risposta del bacino ad un'aumento della percentuale di superficie impermeabile, rapportandola al valore di riferimento U_{10} . Analogamente viene fatto per la portata al colmo utilizzando il parametro (2.2):

$$\Delta q_{max} = (Q_{max} - Q_{10}) / Q_{max} \quad (2.2)$$

in cui Q_{max} è la portata massima di deflusso in una determinata condizione (funzione dello scenario); Q_{10} è la portata massima con impermeabilizzazione del 10%.

Δq_{max} è un parametro che quantifica la variazione del picco di portata. Le tabelle seguenti mostrano i risultati ricavati (Tab. 2.4):

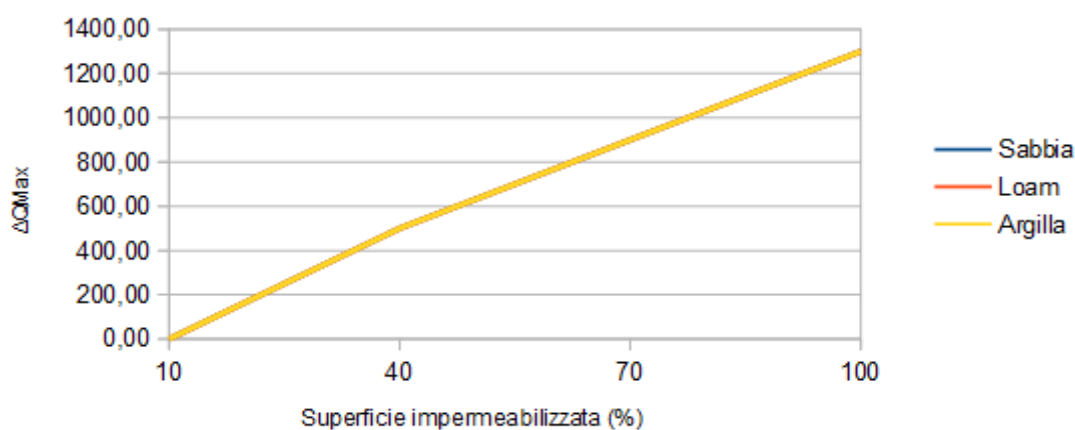
$\Delta q_{max}(\%)$					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Senza LID			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	0,00	500,00	900,00	1300,00
	Loam	0,00	500,00	900,00	1300,00
	Argilla	0,00	500,00	900,00	1300,00
		10	40	70	100
100	Sabbia	0,00	266,67	533,33	833,33
	Loam	0,00	266,67	533,33	833,33
	Argilla	0,00	100,00	187,50	250,00
		10	40	70	100
150	Sabbia	0,00	325,00	625,00	950,00
	Loam	0,00	84,62	161,54	223,08
	Argilla	0,00	40,91	68,18	90,91

(Tab. 2.4a, Valori per Δq_{max} in assenza di LID)

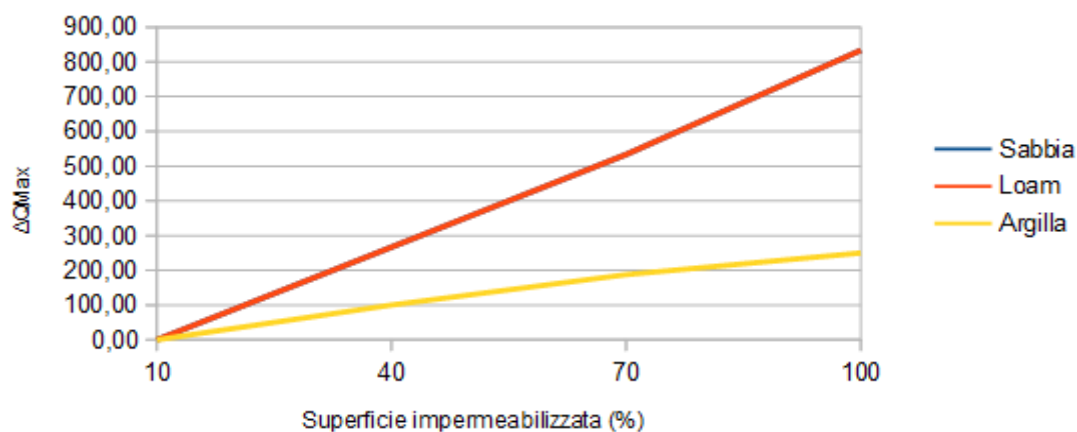
ΔU (%)					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Senza LID			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	0,00	2,96	5,89	8,79
	Loam	0,00	2,96	5,89	8,79
	Argilla	0,00	2,96	5,89	8,79
100	Sabbia	0,00	2,97	5,93	8,87
	Loam	0,00	2,97	5,93	8,87
	Argilla	0,00	1,48	2,90	4,15
150	Sabbia	0,00	2,99	5,96	8,92
	Loam	0,00	1,47	2,89	4,16
	Argilla	0,00	0,57	1,10	1,53

(Tab. 2.4b, Valori per ΔU in assenza di LID)

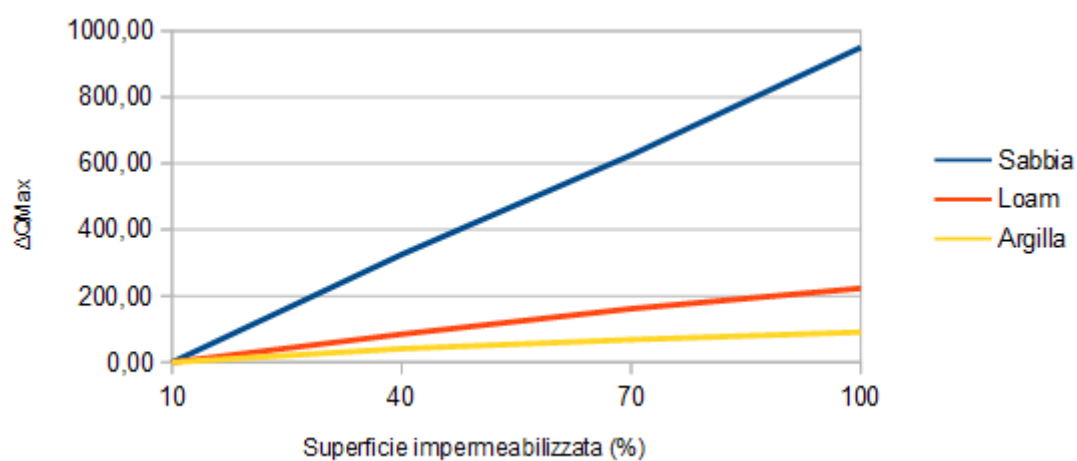
I risultati ricavati vengono esemplificati nei grafici a seguire in Fig 2.6 per Δq_{max} e Fig. 2.7 per ΔU :



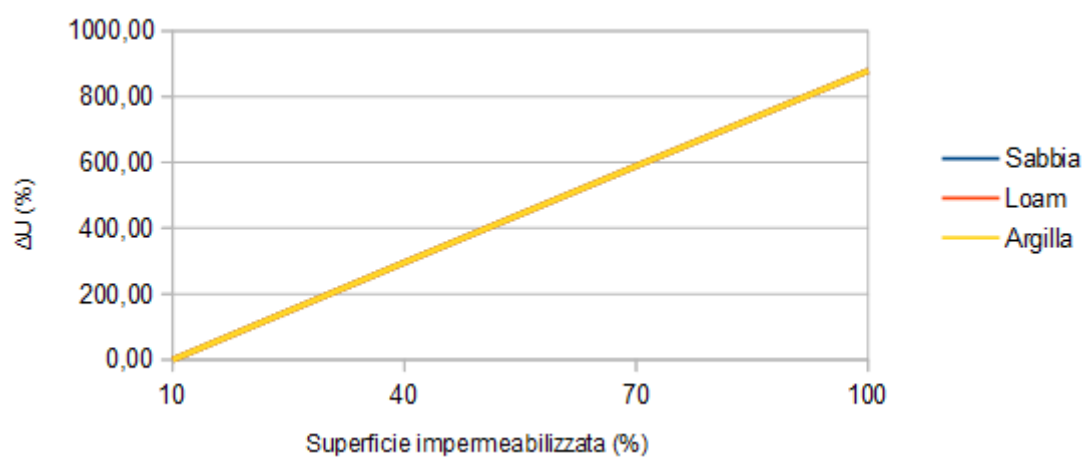
(Fig. 2.6a, Δq_{max} con intensità di pioggia pari a 50mm/h)



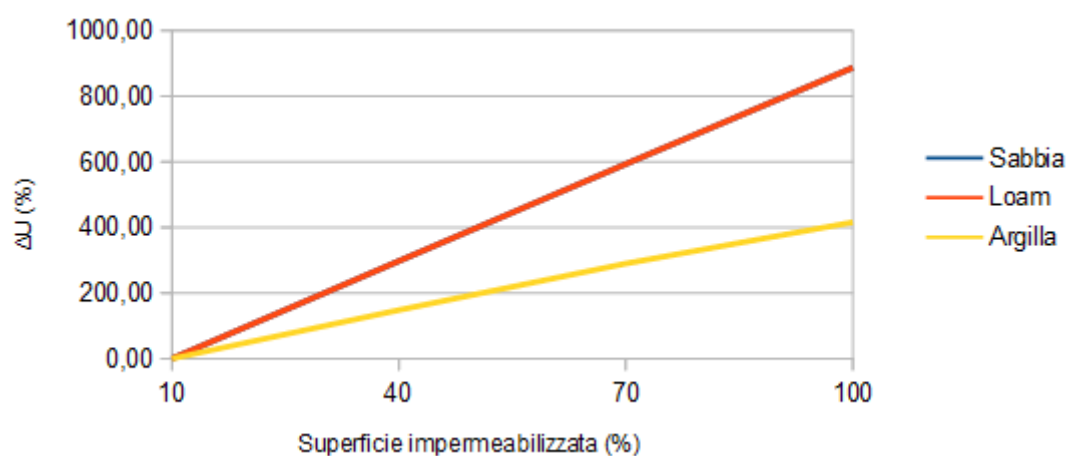
(Fig. 2.6b, Δq_{max} con intensità di pioggia pari a 100mm/h)



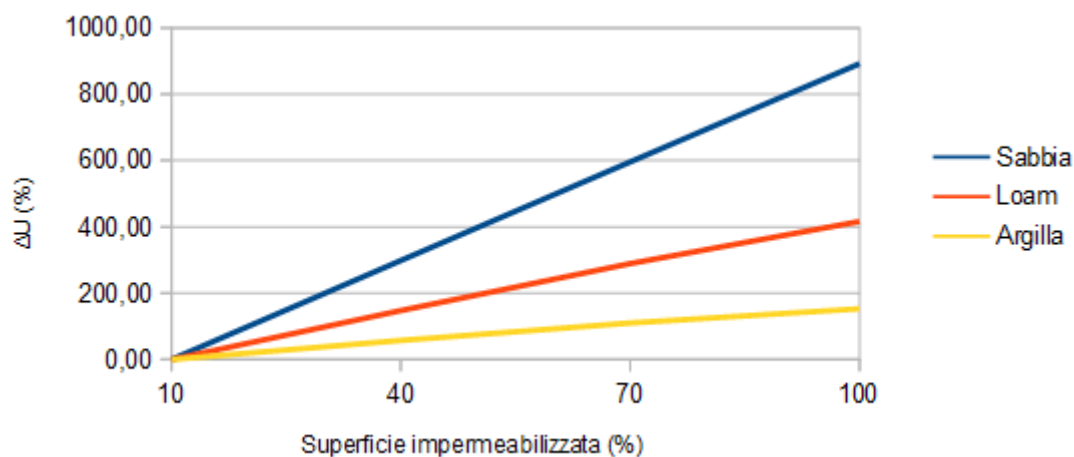
(Fig. 2.6c, Δq_{max} con intensità di pioggia pari a 150mm/h)



(Fig. 2.7a, ΔU con intensità di pioggia pari a 50mm/h)



(Fig. 2.7b, ΔU con intensità di pioggia pari a 100mm/h)



(Fig. 2.7c, ΔU con intensità di pioggia pari a 150mm/h)

Si può notare come, per intensità di pioggia contenute (Fig. 2.6a, 2.7a), il comportamento dei bacini in cui sono presenti terreni con differenti permeabilità risulti equivalente. Ciò si verifica perchè la quantità d'acqua introdotta dalla precipitazione non è comunque eccessiva per i terreni meno permeabili, e riesce ad infiltrarsi completamente. Si constata quindi che l'incremento di deflusso a valle, nella situazione sopra descritta, è da addebitarsi interamente all'incremento di deflusso e non dipende dal terreno presente nella porzione permeabile dei bacini.

Per intensità di pioggia maggiori (Fig. 2.6c, 2.7c) invece, si ha una risposta differente dei bacini al variare della tipologia di terreno presente. Questo è dato dall'eccessiva acqua immessa nel sistema, che i terreni meno permeabili non sono in grado di drenare sufficientemente in fretta, generando deflusso.

Seppur potrebbe sembrare controintuitivo, al crescere dell'intensità di pioggia i valori di Δq_{max} e ΔU sono minori per terreni meno permeabili. Ciò avviene perchè i parametri sono riferiti ai rispettivi Q_{10} e U_{10} , che sono diversi per ogni terreno, mentre al contrario Q_{100} e U_{100} rimangono costanti, in quanto sono relativi ad un bacino

impermeabilizzato al 100%, e non dipendono dalla permeabilità del suolo.

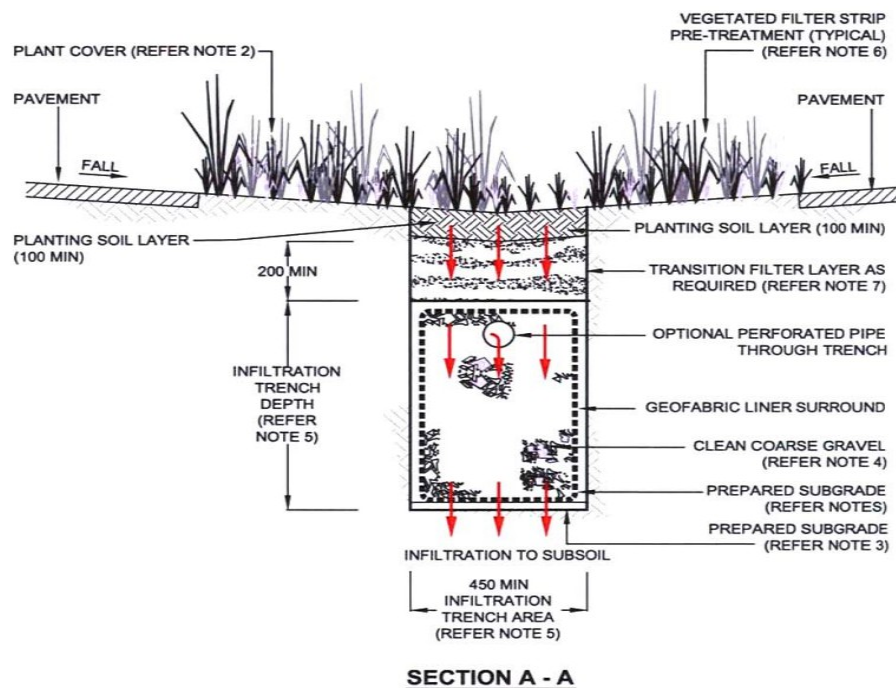
Sia il picco di portata che il coefficiente udometrico mostrano curve con un'andamento sostanzialmente lineare e crescente all'aumentare della superficie del bacino impermeabilizzata, come ci si aspettava.

2.5 - Costruzione dei LID

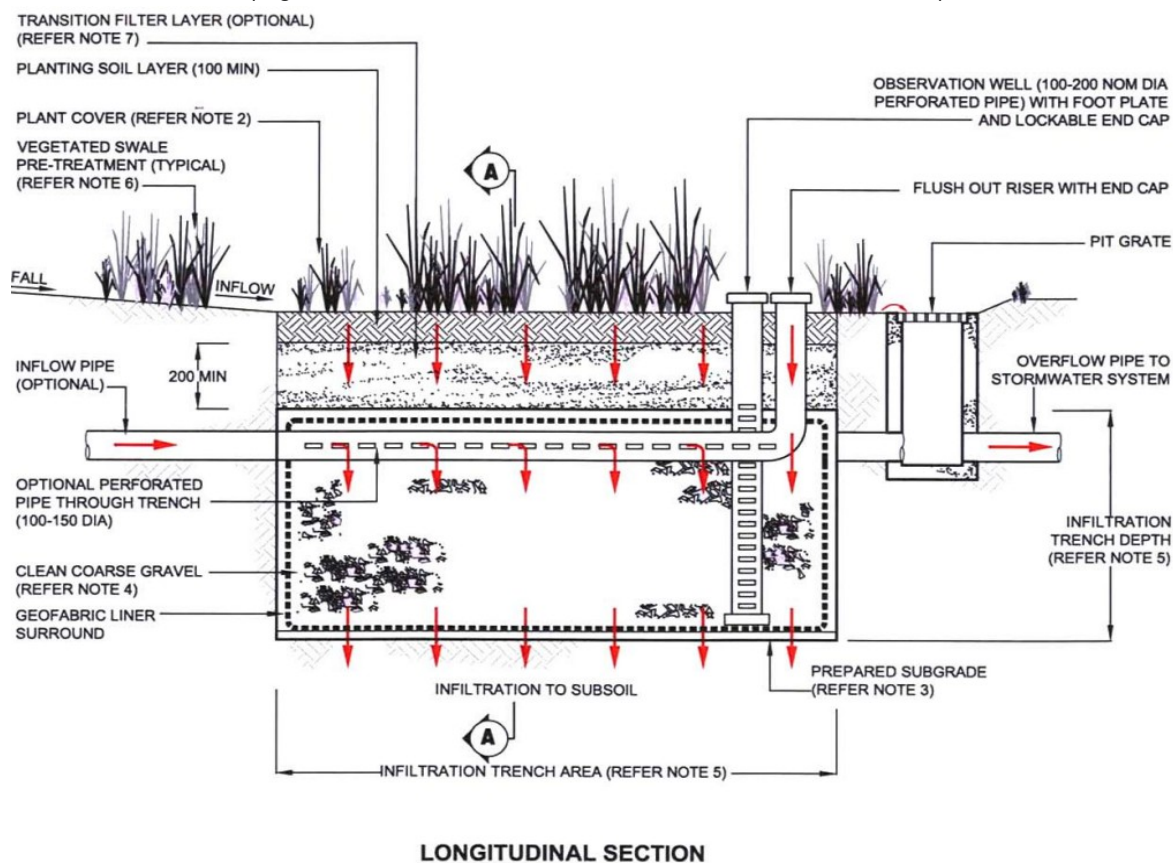
Conoscendo la situazione del deflusso nel bacino, si vogliono ora analizzare le prestazioni di quattro LID in quanto a capacità di trattenere il deflusso. Questi sono: la trincea d'infiltrazione, il tetto giardino, l'asfalto poroso e la vasca di laminazione. La scelta si è rivolta verso le soluzioni più diffuse e facilmente implementabili. Gli schemi costruttivi della trincea d'infiltrazione, dell'asfalto poroso e della vasca di laminazione provengono da URS Australia Pty Ltd 2004, mentre il tetto giardino da Lundholm J., 2007. Questi schemi, oltre ad essere utilizzati come guida per la costruzione dei LID in SWMM, serviranno poi nel CAPITOLO 3 per l'analisi economica. Vengono di seguito descritte nel dettaglio le loro caratteristiche funzionali e costruttive, con i relativi dati utilizzati in SWMM per la loro configurazione.

2.5.1 - Trincea d'infiltrazione

Lo schema costruttivo della trincea d'infiltrazione è rappresentato in (Fig 2.8). La trincea è caratterizzata da uno strato superficiale di 100mm composto da terreno adatto alla crescita della vegetazione, seguito da uno strato filtro tipicamente di sabbia di 200mm fino ad arrivare allo strato drenante riempito di ghiaia, in cui viene accumulata l'acqua. L'altezza di quest'ultimo varia in base a diversi fattori, tra cui la superficie impermeabile che la trincea è addetta a drenare. Lo strato di ghiaia è avvolto in geotessuto per proteggerla dal terreno circostante, ed evitare di intasarne i vuoti.



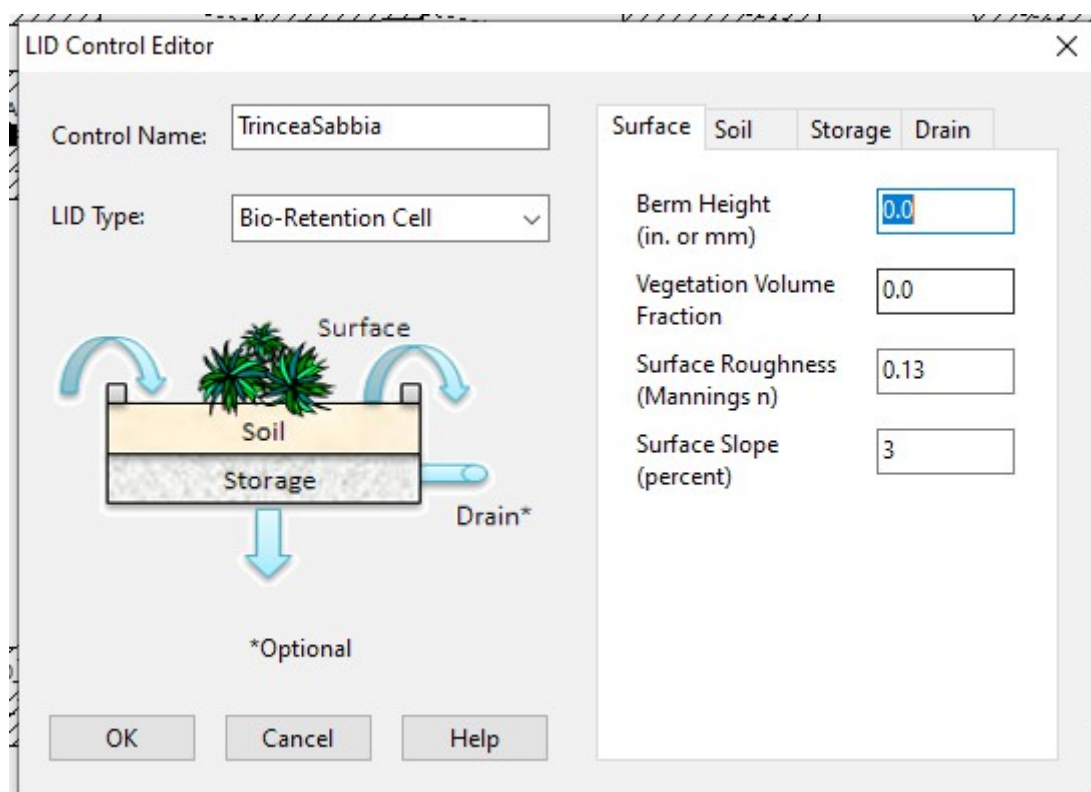
(Fig. 2.8a, Sezione trasversale di una trincea d'infiltrazione)



(Fig. 2.8b, Sezione longitudinale di una trincea d'infiltrazione)

Tramite lo strumento "LID Controls" presente in SWMM viene definita la trincea d'infiltrazione selezionando il LID Type "Bio-Retention Cell" che meglio descrive lo schema costruttivo utilizzato.

Questo modello richiede la definizione di alcuni parametri racchiusi nelle categorie "Surface", "Soil", "Storage" e "Drain". La prima riguarda la parte superficiale della trincea (Fig. 2.9a), e contiene:



(Fig. 2.9a, parametri "Surface" per una trincea d'infiltrazione in SWMM)

- "Berm Height", nei casi in cui dei bordi confinanti siano presenti, viene utilizzata per indicare la massima altezza a cui l'acqua può accumularsi sulla superficie prima di traboccare. Per questa trincea non sono stati previsti bordi per cui il valore è stato impostato pari a 0;
- "Vegetation volume" indica la frazione di volume occupata dalla vegetazione all'interno della vasca superficiale. Come già detto, non è previsto l'accumulo

d'acqua in superficie, per cui il valore utilizzato è 0;

- "Surface Roughness" è la n di Manning, la quale rappresenta l'attrito tra superficie e acqua. In questo caso la trincea presenta vegetazione sullo strato superficiale, per cui viene scelto un valore pari a 0.13 adatto al terreno naturale;
- "Surface Slope" è la pendenza del LID e viene scelta pari al 3%. I valori consigliati in letteratura e nel manuale SWMM sono tra l'1 ed il 5%, pertanto si è scelto il valore medio per rappresentare meglio diverse situazioni, e per mantenere la stessa pendenza utilizzata per il resto del bacino;

Per quanto riguarda lo strato "Soil", la trincea utilizzata presenta sia uno strato di loam che uno strato di sabbia. Poichè lo SWMM non permette di specificare più strati con caratteristiche diverse, i valori presi si riferiscono al solo loam. Infatti, essendo posti in serie ed essendo il loam meno permeabile della sabbia, esso è il principale ostacolo all'infiltrazione dell'acqua. I valori utilizzati sono tratti dalla tabella (Tab. 2.5).

Soil Texture Class	K	Ψ	ϕ	FC	WP
Sand	4.74	1.93	0.437	0.062	0.024
Loamy Sand	1.18	2.40	0.437	0.105	0.047
Sandy Loam	0.43	4.33	0.453	0.190	0.085
Loam	0.13	3.50	0.463	0.232	0.116
Silt Loam	0.26	6.69	0.501	0.284	0.135
Sandy Clay Loam	0.06	8.66	0.398	0.244	0.136
Clay Loam	0.04	8.27	0.464	0.310	0.187
Silty Clay Loam	0.04	10.63	0.471	0.342	0.210
Sandy Clay	0.02	9.45	0.430	0.321	0.221
Silty Clay	0.02	11.42	0.479	0.371	0.251
Clay	0.01	12.60	0.475	0.378	0.265

K = hydraulic conductivity, in/hr

Ψ = suction head, in.

ϕ = porosity, fraction

FC = field capacity, fraction

WP= wilting point, fraction

Source: Rawls, W.J. et al., (1983). *J. Hyd. Engr.*, 109:1316.

(Tab. 2.5, Valori dei parametri caratterizzanti alcuni terreni)

I seguenti parametri vengono richiesti da SWMM per la categoria "Soil":

- "Porosity": rapporto tra volume dei vuoti e volume totale del terreno;
- "Thickness": spessore dello strato di terreno, in questo caso 100mm;
- "Porosity": rapporto tra volume dei vuoti e volume totale del terreno;
- "Field Capacity": rapporto tra il volume dell'acqua e il volume totale dopo il drenaggio del terreno;
- "Wilting point": rapporto tra il volume d'acqua e il volume del terreno asciutto;
- "Conductivity": conducibilità idraulica, ovvero la velocità con cui l'acqua si muove attraverso il terreno;
- "Conductivity Slope": pendenza della curva di conducibilità idraulica;
- "Suction Head": valore medio della tensione capillare del terreno.

Vengono poi definiti i parametri relativi all'immagazzinamento dell'acqua (Fig. 2.9b):

The screenshot shows the 'LID Control Editor' dialog box. The 'Control Name' is 'TrinceaSabbia' and the 'LID Type' is 'Bio-Retention Cell'. The 'Storage' tab is selected, showing parameters for water storage: Thickness (1000), Void Ratio (0.54), Seepage Rate (12.7), and Clogging Factor (0). A diagram on the left illustrates the LID structure with layers for Surface, Soil, and Storage, and an optional Drain at the bottom.

Parameter	Value
Thickness (in. or mm)	1000
Void Ratio (Voids / Solids)	0.54
Seepage Rate (in/hr or mm/hr)	12.7
Clogging Factor	0

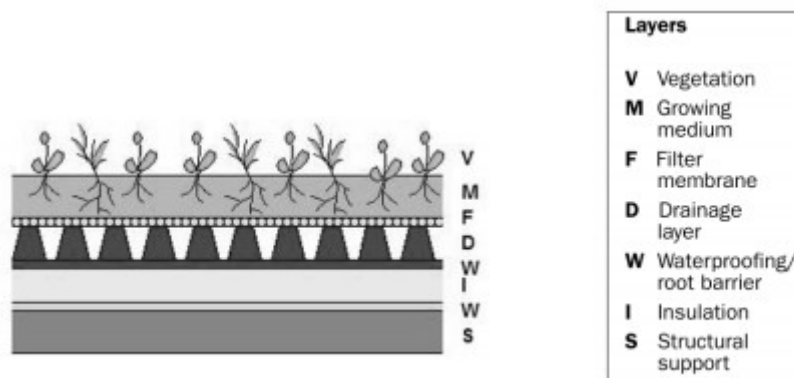
(Fig. 2.9b, parametri "Storage" per una trincea d'infiltrazione in SWMM)

- "Thickness": altezza dello strato drenante. Come anticipato, la scelta di questo valore può dipendere da vari fattori, tra cui l'area in pianta della trincea o la superficie impermeabile che è progettata a drenare. In questo caso, non conoscendo questi fattori in anticipo, fisso l'altezza ad un metro, per poi calcolarli successivamente;
- "Void Ratio": rapporto tra il volume dei vuoti ed il volume della parte solida, viene scelto il valore di 0.54, corrispondente ad una porosità del 35%;
- "Seepage Rate": la velocità d'infiltrazione dell'acqua nel terreno sottostante lo strato drenante, lo stesso utilizzato con Horton per la velocità minima d'infiltrazione. Ciò richiede un valore diverso in base alla tipologia di terreno presente nei bacini, pertanto ciò ha richiesto l'utilizzo di tre LID controls per rappresentare la trincea nei tre terreni: sabbioso, loam e argilloso.
- "Clogging Factor": è un fattore che tiene in considerazione l'occlusione nel tempo dei pori, che può ostacolare l'infiltrazione dell'acqua. Poichè lo studio non fa valutazioni di tipo prestazionale nel tempo, questo valore viene posto pari a zero per la trincea e gli altri LID utilizzati.

L'ultima categoria è la "Drain", relativa al drenaggio dell'acqua tramite tubazioni che raccolgono acqua e la immettono nel sistema fognario. Poichè l'acqua rimossa tramite questo sistema non contribuisce all'invarianza idraulica, questa componente non viene utilizzata nell'analisi.

2.5.2 - Tetto giardino

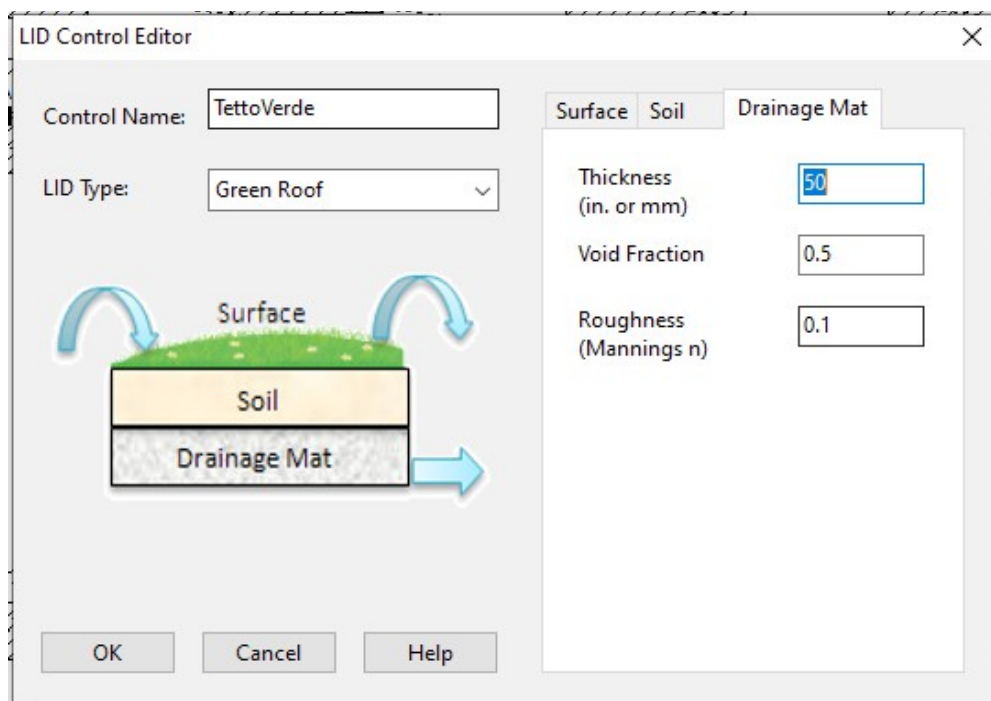
Lo schema costruttivo del tetto giardino viene mostrato in Fig. 2.10:



(Fig. 2.10, stratigrafia di un tipico tetto giardino)

La stratigrafia si compone di uno strato di terreno per la crescita della vegetazione di 100mm, seguito da tessuto non tessuto e lo strato drenante. Quest'ultimo ospita un "drainage mat", un elemento di drenaggio per la raccolta e ritenzione delle acque.

La LID type utilizzata per il tetto giardino in SWMM è "Green Roof" (Fig. 2.11).

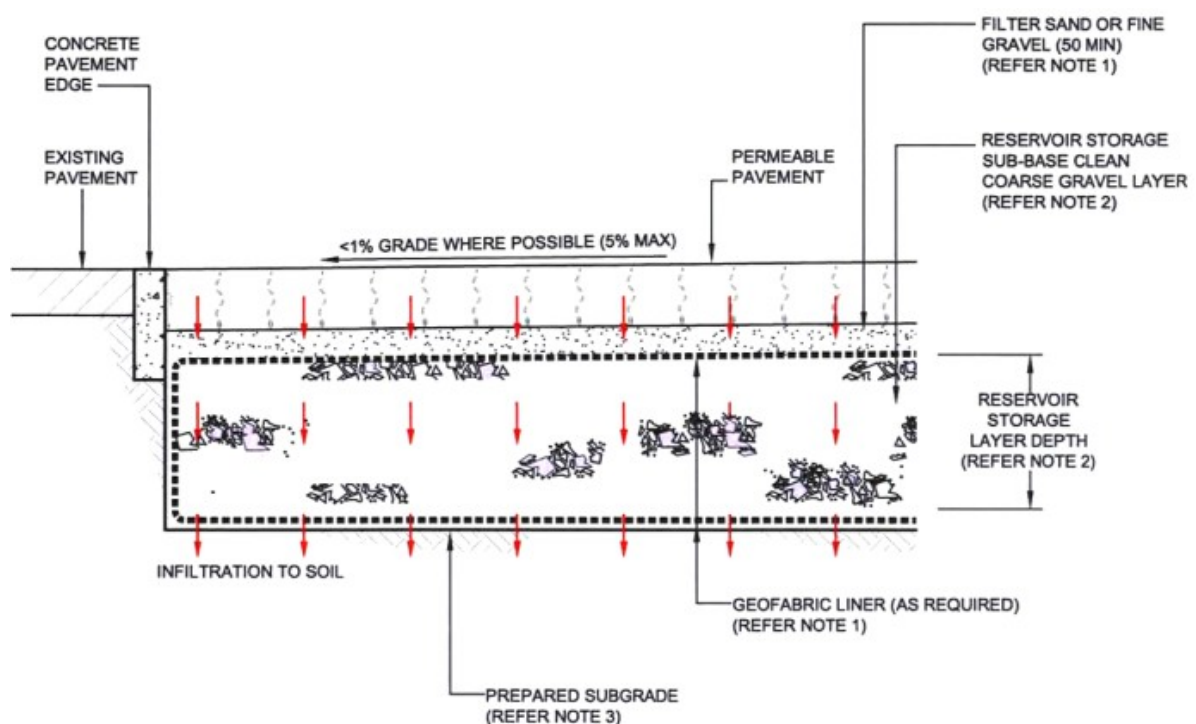


(Fig. 2.11, parametri "Drainage Mat" per il tetto giardino)

L'impostazione del LID control del tetto giardino richiede i parametri di "Surface", "Soil" e "Drainage Mat". I primi due sono equivalenti a quelli già visti per la trincea di infiltrazione, mentre per quanto riguarda il terzo vanno specificati:

- Thickness: lo spessore dell'elemento di drenaggio, preso pari a 50mm.
- Void Fraction: il rapporto tra volume dei vuoti e volume totale dell'elemento di drenaggio, preso pari a 0.5.
- Roughness: n di Manning dell'elemento di drenaggio, posto pari a 0.1.

2.5.3 - Asfalto poroso



(Fig. 2.12, sezione di una pavimentazione permeabile di tipo infiltrante)

Lo schema costruttivo scelto per l'asfalto poroso è di tipo infiltrante, ovvero la superficie inferiore dello strato drenante è a contatto con il terreno. La sezione in

(Fig. 2.12) è composta da uno strato superficiale in asfalto poroso, il quale presenta una percentuale di vuoti superiore rispetto all'asfalto tradizionale, permettendo all'acqua di penetrare negli strati più profondi. Subito dopo si trova uno strato filtro in sabbia e uno strato drenante riempito di ghiaia, avvolta da geotessuto.

Il LID type utilizzato in SWMM è "Permeable Pavement". Per la categoria "Surface", viene utilizzata una n di Manning pari a 0.011, valida per l'asfalto liscio. Lo spessore dello strato filtro utilizzato, viene scelto pari a 50mm, mentre lo strato drenante è pari a 300mm.

La categoria aggiuntiva rispetto ai LID già configurati, è "Pavement" in cui vanno assegnati valori ai parametri relativi allo strato di asfalto (Fig. 2.13).

LID Control Editor

Control Name:

LID Type:

Diagram: A cross-section of the LID showing layers: Surface, Pavement, Soil*, and Storage. A Drain* is shown on the right. Arrows indicate flow from the Surface into the Pavement and then down through the layers. A note below the diagram says "*Optional".

Soil	Storage	Drain
Surface	Pavement	
Thickness (in. or mm)	100	
Void Ratio (Voids / Solids)	0.15	
Impervious Surface Fraction	0	
Permeability (in/hr or mm/hr)	3000	
Clogging Factor	0	
Regeneration Interval (days)	0	
Regeneration Fraction	0	

OK Cancel Help

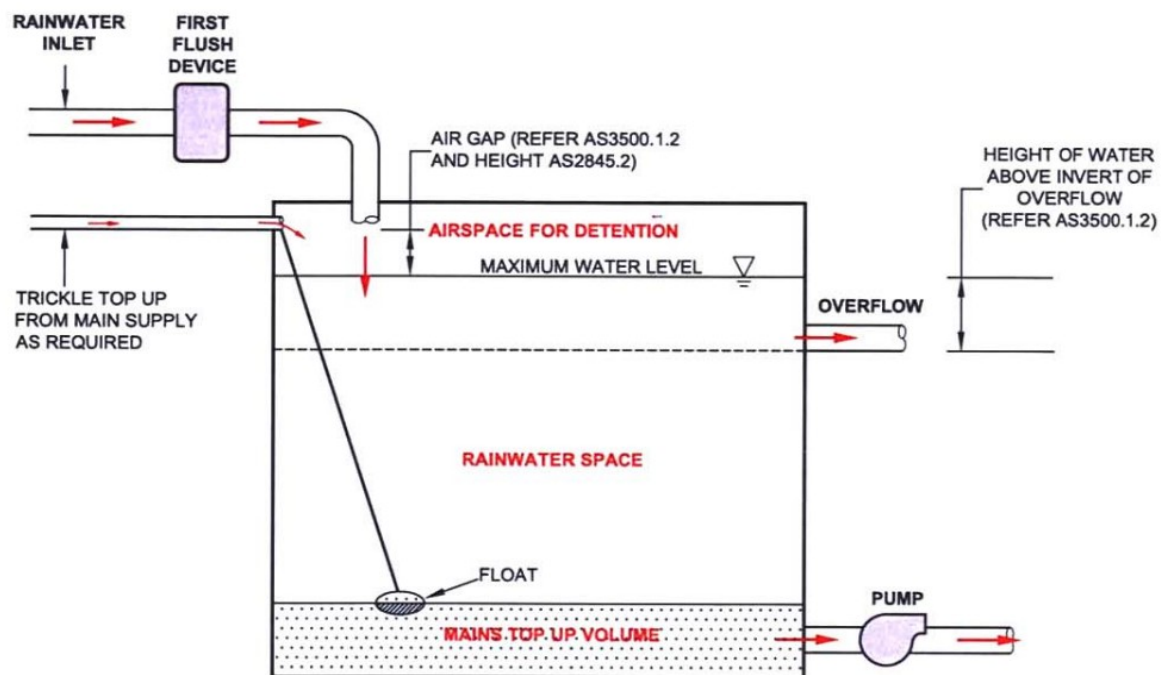
(Fig. 2.13, parametri "Pavement" per l'asfalto poroso)

- Thickness: spessore dello strato di asfalto poroso, scelto pari a 100mm.
- Void Ratio: rapporto tra il volume dei vuoti e il volume dei solidi, preso pari a 0.15 per l'asfalto poroso.
- Impervious Surface: indica percentuale di area occupata dal materiale impermeabile sulla superficie totale. Posta pari a zero per pavimentazioni continue, come in questo caso.
- Permeability: è la permeabilità dello strato di asfalto. Viene scelta pari a 3000mm/h, valore tipico per asfalto nuovo.

La permeabilità tende a ridursi nel tempo a causa dell'ostruzione dei pori, ed è legata al Clogging Factor (fattore di ostruzione), Regeneration Interval e Regeneration Fraction (fattori legati alla manutenzione dell'asfalto). Ciò non viene considerato nello studio, sia per via del limitato impatto che ciò ha nella creazione di deflusso, sia perchè l'analisi si occupa di valutare LID nuovi e non le loro prestazioni nel lungo periodo.

2.5.4 - Vasca di laminazione

Per la vasca di laminazione è stato utilizzato il LID Type "Rain Barrel", di cui SWMM richiede di specificare l'altezza, che in questo caso è fissata a 1 metro. Il valore è convenzionale e la capacità finale della vasca dipenderà dall'area in pianta che verrà specificato successivamente con l'inserimento dei LID nei bacini. Di seguito viene mostrato lo schema utilizzato per la vasca di laminazione (Fig. 2.14), che si intende realizzata in calcestruzzo armato, fattore che verrà in seguito utilizzato per l'analisi economica del CAPITOLO 3.



(Fig 2.14, schema costruttivo di una vasca di laminazione)

2.6 - Inserimento dei LID nel bacino

Si procede con l'inserimento dei LID all'interno dei bacini, che come detto in precedenza corrispondono a 36 combinazioni per ognuno. I parametri principali da specificare sono l'estensione dei LID in pianta e la percentuale di area impermeabile da drenare. Per il tetto giardino e l'asfalto poroso, questa percentuale viene posta pari a zero e vengono utilizzati per la sola raccolta delle acque meteoriche cadenti sulla loro superficie. La trincea d'infiltrazione e la vasca di laminazione, invece, sono utilizzate come nodi di raccolta per le acque provenienti dalle superfici impermeabili.

Tecnicamente, lo SWMM non permette di "inserire" un LID all'interno di un bacino, ma solo di aggiungerlo come un subcatchment separato. Quest'ultimo riceve il deflusso dal bacino principale, il LID entra in azione e restituisce indietro le acque in eccesso, se ve ne sono. Per tener conto di quest'area in eccesso, che porta la superficie del bacino oltre un ettaro, è stato necessario ricalcolare le aree dei bacini e le percentuali di superficie impermeabile, in modo da poter successivamente raffrontare i dati con il bacino senza LID, la cui superficie è un ettaro.

Pertanto, se un LID occupa 100m^2 , l'area del bacino a cui viene aggiunto sarà di 9900m^2 , in modo che il totale sia comunque un ettaro. In questo caso si è scelto di inserire i LID nella superficie che precedentemente era impermeabile, in modo da poter valutare appieno la loro efficacia rispetto ad una condizione in cui non c'è alcuna gestione del deflusso. Nel caso di inserimento in terreno permeabile invece, si sarebbe dovuto tener conto della capacità drenante già presente, e sommarla alla prestazione del LID in modo da ottenere lo stesso risultato.

E' stato quindi necessario rapportare le percentuali di superficie impermeabile di 10, 40 e 70% utilizzate per le simulazioni, alla nuova superficie del bacino, che nell'esempio di un LID di 100m^2 saranno rispettivamente pari a 9.091, 39.394 e 69.697%.

2.6.1 – Trincea d'infiltrazione

Il primo parametro da impostare è la superficie occupata dalla trincea nel bacino. Sono state effettuate prove con valori di 1m^2 e 100m^2 , nel primo caso le piccole quantità di deflusso causavano problemi di precisione nel software che ha dei limiti nel numero di cifre decimali, mentre nel secondo caso la trincea era troppo grande per i bacini con il 10% di impermeabilizzazione, poichè in grado di drenare più superficie di quella disponibile. Si è scelto quindi di utilizzare una trincea di 10m^2 .

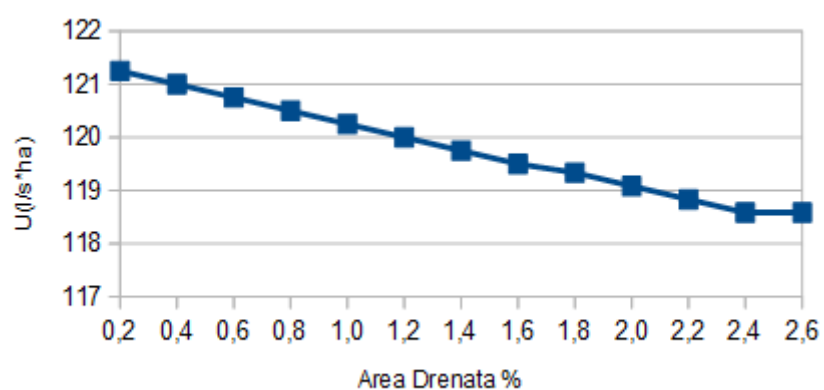
La trincea, come la vasca di laminazione, non si occupa solamente di raccogliere le acque che cadono sulla sua superficie, ma raccoglie il deflusso dalle superfici impermeabili circostanti. E' stato quindi necessario calcolare l'area massima che una trincea di 10m^2 è in grado di drenare, meglio conosciuta come "area limite drenabile". E' stato quindi calcolato il coefficiente udometrico variando progressivamente la superficie impermeabile drenata.

I risultati evidenziano il fenomeno di sovraccarico della trincea che avviene quando l'area da drenare assegnata è eccessiva. Come facilmente osservabile in Fig 2.15, il coefficiente decresce all'aumentare dell'area da drenare, fino a raggiungere un valore minimo, corrispondente all'area limite drenabile della trincea. Questo valore viene

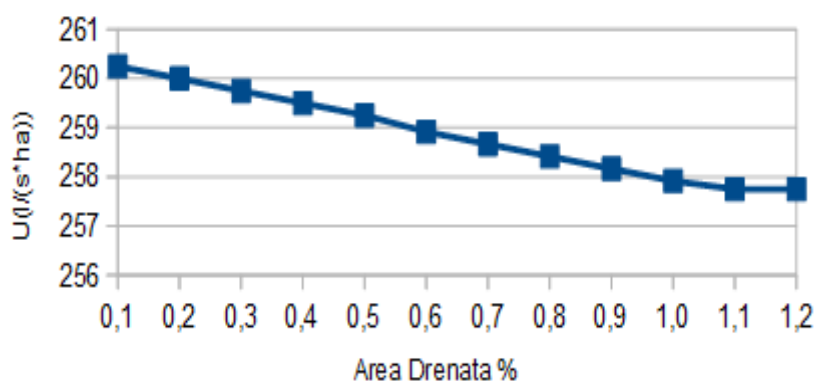
evidenziato in rosso nella tabella 2.6.

Trincea d'infiltrazione (10m ²)			
Intensità di pioggia (mm/h)	Deflusso(10 ⁶ l)	Area Imperm Drenata (%)	U (l/(s*ha))
50	0,1455	0,2	121,25
	0,1452	0,4	121
	0,1449	0,6	120,75
	0,1446	0,8	120,5
	0,1443	1,0	120,25
	0,1440	1,2	120
	0,1437	1,4	119,75
	0,1434	1,6	119,5
	0,1432	1,8	119,33
	0,1429	2,0	119,08
	0,1426	2,2	118,83
	0,1423	2,4	118,58
	0,1423	2,6	118,58
100	0,3123	0,1	260,25
	0,3120	0,2	260
	0,3117	0,3	259,75
	0,3114	0,4	259,5
	0,3111	0,5	259,25
	0,3107	0,6	258,92
	0,3104	0,7	258,67
	0,3101	0,8	258,42
	0,3098	0,9	258,17
	0,3095	1,0	257,92
	0,3093	1,1	257,75
	0,3093	1,2	257,75
150	0,4793	0,05	399,42
	0,4790	0,10	399,17
	0,4788	0,15	399
	0,4785	0,20	398,75
	0,4783	0,25	398,58
	0,4780	0,30	398,33
	0,4778	0,35	398,17
	0,4776	0,40	398
	0,4773	0,45	397,75
	0,4771	0,50	397,58
	0,4768	0,55	397,33
	0,4766	0,60	397,17
	0,4764	0,65	397
	0,4764	0,70	397

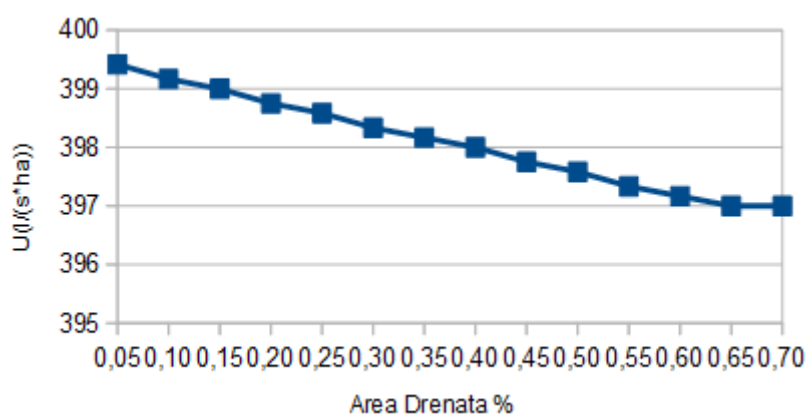
(Tab. 2.6, valori del coefficiente udometrico al crescere dell'area impermeabile da drenare per una trincea di 10m²)



(Fig 2.15a, coefficiente udometrico nel bacino con la trincea d'infiltrazione al variare della percentuale di area drenata, per intensità di pioggia di 50mm/h)



(Fig 2.15b, coefficiente udometrico nel bacino con la trincea d'infiltrazione al variare della percentuale di area drenata, per intensità di pioggia di 100mm/h)



(Fig 2.15c, coefficiente udometrico nel bacino con la trincea d'infiltrazione al variare della percentuale di area drenata, per intensità di pioggia di 150mm/h)

Si procede infine con l'inserimento della trincea di infiltrazione nel bacino (Fig 2.16):

LID Usage Editor

LID Control Name: **TrinceaSabbia**

LID Area (3D diagram showing flow direction and width)

Detailed Report File (Optional):

☐ LID Occupies Full Subcatchment

Area of Each Unit (sq ft or sq m):

Number of Units:

% of Subcatchment Occupied:

Surface Width per Unit (ft or m):

% Initially Saturated:

% of Impervious Area Treated:

% of Pervious Area Treated:

Send Drain Flow To:
(Leave blank to use subcatchment outlet)

☒ Return all Outflow to Pervious Area

OK **Cancel** **Help**

(Fig. 2.16, parametri di utilizzo di una trincea d'infiltrazione in un bacino)

Si fa notare che l'area limite drenabile è stata calcolata su bacino con il 100% di superficie impermeabile, e poichè SWMM richiede di inserire questo valore in percentuale alla voce "% of Impervious Area Treated", ciò ha richiesto di rapportare i valori trovati alle percentuali del 10, 40 e 70% utilizzate negli altri bacini.

2.6.2 – Tetto giardino

Come detto in precedenza, il tetto giardino non si occupa di drenare alcuna superficie oltre alla propria, per cui si procede direttamente con l'inserimento all'interno dei bacini (Fig 2.17)

LID Usage Editor

LID Control Name: TettoVerde

LID Area

Width

Detailed Report File (Optional)

☐ LID Occupies Full Subcatchment

Area of Each Unit (sq ft or sq m): 100

Number of Units: 1

% of Subcatchment Occupied: 1.010

Surface Width per Unit (ft or m): 0

% Initially Saturated: 0

% of Impervious Area Treated: 0

% of Pervious Area Treated: 0

Send Drain Flow To:
(Leave blank to use subcatchment outlet)

☒ Return all Outflow to Pervious Area

OK Cancel Help

(Fig. 2.17, parametri di utilizzo di un tetto giardino in un bacino)

Come si può vedere in figura, è stato inserito un singolo tetto giardino con un'estensione di 100m². Infatti, questa tipologia di LID tratta quantitativi d'acqua minori rispetto ad altre soluzioni, per cui è stato scelto di utilizzare una superficie maggiore della trincea, in modo da ottenere risultati sullo stesso ordine di grandezza.

2.6.3 – Asfalto poroso

L'inserimento dell'asfalto poroso nei bacini avviene in modo analogo al tetto giardino, ed anche in questo caso la superficie utilizzata per questo LID è di 100m², come mostrato in Fig 2.18.

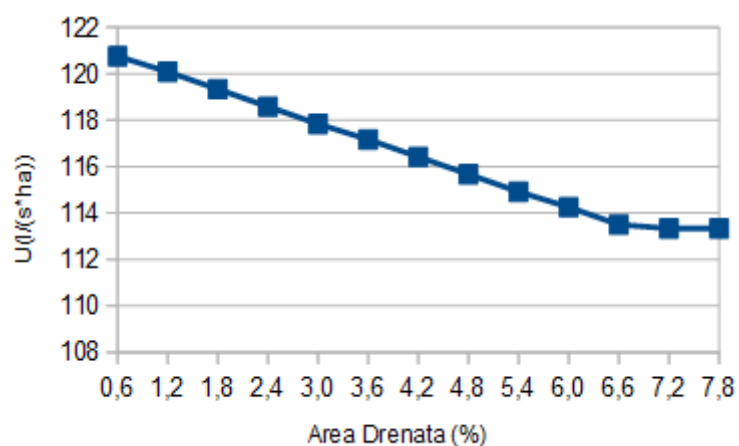
(Fig. 2.18, parametri di utilizzo di un tetto giardino in un bacino)

2.6.4 – Vasca di laminazione

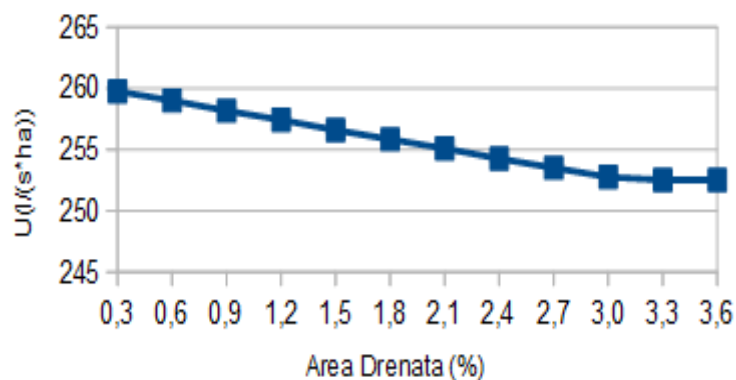
L'ultimo LID è la vasca di laminazione, la quale richiede il calcolo dell'area limite drenabile, come è stato fatto per la trincea d'infiltrazione. Anche in questo caso è stata utilizzata una superficie in pianta di 10m^2 , che moltiplicata per l'altezza di un metro utilizzata prima per la creazione del LID, corrisponde a 10m^3 di capienza. Vengono riportati i risultati ottenuti in Tab 2.7 e graficamente in Fig. 2.19, e sono evidenziati in rosso i valori corrispondenti all'area limite drenabile.

Vasca di Laminazione (10m ²)			
Intensità di pioggia (mm/h)	Deflusso(10 ⁶ l)	Area Imperm Drenata (%)	U (l/(s*ha))
50	0,1449	0,6	120,75
	0,1441	1,2	120,08
	0,1432	1,8	119,33
	0,1423	2,4	118,58
	0,1414	3,0	117,83
	0,1406	3,6	117,17
	0,1397	4,2	116,42
	0,1388	4,8	115,67
	0,1379	5,4	114,92
	0,1371	6,0	114,25
	0,1362	6,6	113,5
	0,1360	7,2	113,33
	0,1360	7,8	113,33
100	0,3117	0,3	259,75
	0,3108	0,6	259
	0,3098	0,9	258,17
	0,3089	1,2	257,42
	0,3079	1,5	256,58
	0,3070	1,8	255,83
	0,3061	2,1	255,08
	0,3051	2,4	254,25
	0,3042	2,7	253,5
	0,3033	3,0	252,75
	0,3030	3,3	252,5
	0,3030	3,6	252,5
150	0,4788	0,15	399
	0,4781	0,30	398,42
	0,4773	0,45	397,75
	0,4766	0,60	397,17
	0,4759	0,75	396,58
	0,4752	0,90	396
	0,4745	1,05	395,42
	0,4737	1,20	394,75
	0,4730	1,35	394,17
	0,4723	1,50	393,58
	0,4716	1,65	393
	0,4709	1,80	392,42
	0,4701	1,95	391,75
	0,4700	2,10	391,67
	0,4700	2,25	391,67

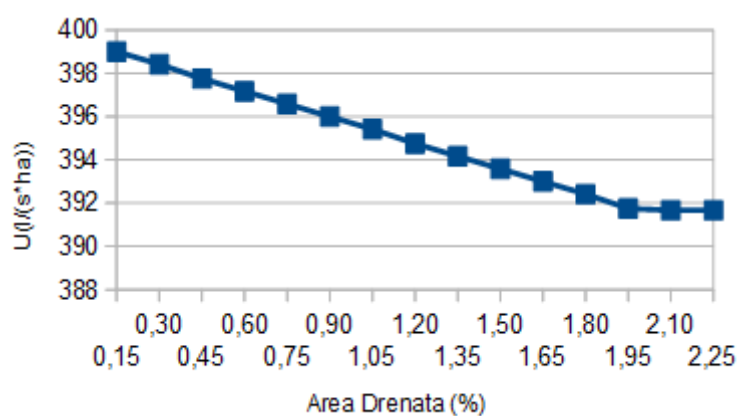
(Tab. 2.7, valori del coefficiente udometrico al crescere dell'area impermeabile da drenare per una trincea di 10m²)



(Fig 2.19a, coefficiente udometrico nel bacino con la vasca di laminazione al variare della percentuale di area drenata, per intensità di pioggia di 50mm/h)



(Fig 2.19b, coefficiente udometrico nel bacino con la vasca di laminazione al variare della percentuale di area drenata, per intensità di pioggia di 100mm/h)



(Fig 2.19c, coefficiente udometrico nel bacino con la vasca di laminazione al variare della percentuale di area drenata, per intensità di pioggia di 150mm/h)

Si procede quindi con l'inserimento nel bacino (Fig. 2.20) e come per la trincea d'infiltrazione, l'area limite drenabile è stata calcolata su bacino con il 100% di superficie impermeabile, e ciò ha richiesto di ricalcolare i valori dell'area limite drenabile alle percentuali del 10, 40 e 70%.

LID Usage Editor

LID Control Name: VascaLam

LID Area

Detailed Report File (Optional)

☐ LID Occupies Full Subcatchment

Area of Each Unit (sq ft or sq m): 10

Number of Units: 1

% of Subcatchment Occupied: 0.100

Surface Width per Unit (ft or m): 0

% Initially Saturated: 0

% of Impervious Area Treated: 8.25

% of Pervious Area Treated: 0

Send Drain Flow To:
(Leave blank to use subcatchment outlet)

☒ Return all Outflow to Pervious Area

OK Cancel Help

(Fig. 2.20, parametri di utilizzo di una vasca di laminazione in un bacino)

2.7 - Risposta dei bacini con LID

Il comportamento dei bacini viene simulato in presenza di LID e messo a confronto con i risultati calcolati precedentemente per il bacino senza LID. Si vuole valutare la differenza nella risposta del bacino, soggetto a progressiva impermeabilizzazione, in seguito all'inserimento di LID, il cui ruolo è quello di ridurre il deflusso, e quindi il coefficiente udometrico. Per far ciò, questa differenza viene rapportata alla risposta dello stesso bacino impermeabile per il 10%, che rappresenta il valore di raggiungere per l'invarianza idraulica. Ciò viene svolto utilizzando il parametro $\Delta U'$, calcolato tramite la formula (2.3):

$$\Delta U' = (U_{max} - U) / (U_{max} - U_{10}) \quad (2.3)$$

dove U_{max} è il valore massimo che il coefficiente udometrico può raggiungere per effetto del livello di urbanizzazione scelto, ovvero corrisponde a U_{100} , U_{70} e U_{40} rispettivamente nei bacini con il 100, 70 e 40% di superficie impermeabilizzata; U è il coefficiente udometrico in una determinata condizione (funzione dell'intensità di pioggia e delle caratteristiche del bacino) nel bacino con LID; U_{10} è il coefficiente di deflusso nelle condizioni pre-costruzione.

$\Delta U'$ è il rapporto tra la variazione di deflusso conseguente all'inserimento di un LID nel bacino e la variazione in assenza di LID, rappresentando quindi un parametro di efficacia del LID. Il denominatore rappresenta il massimo valore che il numeratore può raggiungere, il che porta $\Delta U'$ ad essere compreso tra 0 ed 1. Nel caso in cui il LID non offrirà alcun contributo al raggiungimento dell'invarianza idraulica, il coefficiente udometrico U sarà massimo e pari ad U_{max} , portando $\Delta U'$ ad azzerarsi.

Qualora invece il LID fosse in grado di ridurre il coefficiente udometrico U al valore minimo U_{10} , verrebbe raggiunta l'invarianza idraulica e $\Delta U'$ sarebbe pari a 1.

Ovviamente è anche possibile che il valore U sia inferiore a U_{10} , portando il deflusso ad essere inferiore di quello nel bacino pre-costruzione, ma ciò ai fini di questo studio non viene ritenuto d'interesse perchè va oltre gli obbiettivi dell'invarianza idraulica. Di seguito vengono presentati i risultati (Tab. 2.8), a cominciare dal volume totale defluito dai bacino con LID:

Volume Totale Defluito (10 ⁶ litri)					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Trincea d'infiltrazione (10m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	0,0113	0,0554	0,0991	0,1423
	Loam	0,0113	0,0554	0,0991	0,1424
	Argilla	0,0113	0,0554	0,0991	0,1424
		10	40	70	100
100	Sabbia	0,0282	0,1224	0,2161	0,3093
	Loam	0,0282	0,1224	0,2161	0,3094
	Argilla	0,0573	0,1469	0,2330	0,3094
		10	40	70	100
150	Sabbia	0,0452	0,1896	0,3333	0,4764
	Loam	0,0898	0,2268	0,3585	0,4764
	Argilla	0,1868	0,2957	0,3951	0,4765

(Tab. 2.8a, valori del deflusso per un bacino con una trincea d'infiltrazione di 10m²)

Volume Totale Defluito (10 ⁶ litri)					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Tetto giardino (100m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	0,0134	0,0576	0,1013	0,1453
	Loam	0,0134	0,0576	0,1013	0,1453
	Argilla	0,0134	0,0576	0,1013	0,1453
		10	40	70	100
100	Sabbia	0,0285	0,1228	0,2166	0,3123
	Loam	0,0285	0,1228	0,2166	0,3123
	Argilla	0,0591	0,1490	0,2355	0,3123
		10	40	70	100
150	Sabbia	0,0436	0,1881	0,3319	0,4793
	Loam	0,0908	0,2283	0,3607	0,4793
	Argilla	0,1890	0,2981	0,3977	0,4793

(Tab. 2.8b, valori del deflusso per un bacino con un tetto giardino di 100m²)

Volume Totale Defluito (10 ⁶ litri)					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Asfalto poroso (100m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	0,0134	0,0576	0,1013	0,1445
	Loam	0,0134	0,0576	0,1013	0,1445
	Argilla	0,0134	0,0576	0,1013	0,1445
		10	40	70	100
100	Sabbia	0,0285	0,1228	0,2166	0,3098
	Loam	0,0285	0,1228	0,2166	0,3098
	Argilla	0,0577	0,1474	0,2336	0,3098
		10	40	70	100
150	Sabbia	0,0436	0,1881	0,3319	0,4763
	Loam	0,0885	0,2256	0,3575	0,4756
	Argilla	0,1858	0,2947	0,3941	0,4756

(Tab. 2.8c, valori del deflusso per un bacino con asfalto poroso esteso 100m²)

Volume Totale Defluito (10 ⁶ litri)					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Vasca di laminazione (10m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	0,0041	0,0483	0,0920	0,1360
	Loam	0,0041	0,0483	0,0920	0,1360
	Argilla	0,0041	0,0483	0,0920	0,1360
		10	40	70	100
100	Sabbia	0,0210	0,1153	0,2091	0,3030
	Loam	0,0210	0,1153	0,2091	0,3030
	Argilla	0,0503	0,1399	0,2261	0,3030
		10	40	70	100
150	Sabbia	0,0379	0,1823	0,3262	0,4700
	Loam	0,0826	0,2196	0,3515	0,4700
	Argilla	0,1798	0,2887	0,3882	0,4700

(Tab. 2.8d, valori del deflusso per un bacino con una vasca di laminazione di 10m²)

Da questi valori si procede calcolando i coefficienti udometrici U (Tab. 2.9):

U (l/(s*ha))					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Trincea d'infiltrazione (10m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	9,42	46,17	82,58	118,58
	Loam	9,42	46,17	82,58	118,67
	Argilla	9,42	46,17	82,58	118,67
		10	40	70	100
100	Sabbia	23,50	102,00	180,08	257,75
	Loam	23,50	102,00	180,08	257,83
	Argilla	47,75	122,42	194,17	257,83
		10	40	70	100
150	Sabbia	37,67	158,00	277,75	397,00
	Loam	74,83	189,00	298,75	397,00
	Argilla	155,67	246,42	329,25	397,08

(Tab. 2.9a, valori del coefficiente udometrico per un bacino con una trincea d'infiltrazione di 10m²)

U (l/(s*ha))					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Tetto giardino (100m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	11,17	48,00	84,42	121,08
	Loam	11,17	48,00	84,42	121,08
	Argilla	11,17	48,00	84,42	121,08
		10	40	70	100
100	Sabbia	23,75	102,33	180,50	260,25
	Loam	23,75	102,33	180,50	260,25
	Argilla	49,25	124,17	196,25	260,25
		10	40	70	100
150	Sabbia	36,33	156,75	276,58	399,42
	Loam	75,67	190,25	300,58	399,42
	Argilla	157,50	248,42	331,42	399,42

(Tab. 2.9b, valori del coefficiente udometrico per un bacino con un tetto giardino di 100m²)

U (l/(s*ha))					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Asfalto poroso (100m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	11,17	48,00	84,42	120,42
	Loam	11,17	48,00	84,42	120,42
	Argilla	11,17	48,00	84,42	120,42
		10	40	70	100
100	Sabbia	23,75	102,33	180,50	258,17
	Loam	23,75	102,33	180,50	258,17
	Argilla	48,08	122,83	194,67	258,17
		10	40	70	100
150	Sabbia	36,33	156,75	276,58	396,92
	Loam	73,75	188,00	297,92	396,33
	Argilla	154,83	245,58	328,42	396,33

(Tab. 2.9c, valori del coefficiente udometrico per un bacino con asfalto poroso esteso 100m²)

U (l/(s*ha))					
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Vasca di laminazione (10m ²)			
		Superficie Impermeabile (%)			
		10	40	70	100
50	Sabbia	3,42	40,25	76,67	113,33
	Loam	3,42	40,25	76,67	113,33
	Argilla	3,42	40,25	76,67	113,33
		10	40	70	100
100	Sabbia	17,50	96,08	174,25	252,50
	Loam	17,50	96,08	174,25	252,50
	Argilla	41,92	116,58	188,42	252,50
		10	40	70	100
150	Sabbia	31,58	151,92	271,83	391,67
	Loam	68,83	183,00	292,92	391,67
	Argilla	149,83	240,58	323,50	391,67

(Tab. 2.9d, valori del coefficiente udometrico per un bacino con una vasca di laminazione di 10m²)

Infine, il coefficiente udometrico viene utilizzato per calcolare $\Delta U'$, tramite la formula (2.3), producendo i risultati di Tab. 2.10:

$\Delta U'$				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Trincea d'infiltrazione (10m ²)		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	8,1633	4,1002	2,7481
	Loam	8,1633	4,1002	2,6718
	Argilla	8,1633	4,1002	2,6718
		40	70	100
100	Sabbia	3,8176	1,9149	1,2802
	Loam	3,8176	1,9149	1,2447
	Argilla	3,9019	2,0466	1,3878
		40	70	100
150	Sabbia	2,2837	1,1793	0,8341
	Loam	2,4070	1,3011	0,9302
	Argilla	3,0247	1,6299	1,2065

(Tab. 2.10a, valori di $\Delta U'$ per un bacino con una trincea d'infiltrazione di 10m²)

$\Delta U'$				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Tetto giardino (100m ²)		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	3,1746	1,5945	0,4580
	Loam	3,1746	1,5945	0,4580
	Argilla	3,1746	1,5945	0,4580
		40	70	100
100	Sabbia	3,3934	1,6489	0,2134
	Loam	3,3934	1,6489	0,2134
	Argilla	1,5608	0,6254	0,2379
		40	70	100
150	Sabbia	3,3218	1,6649	0,1622
	Loam	1,3129	0,4833	0,1809
	Argilla	0,8249	0,3835	0,2413

(Tab. 2.10b, valori di $\Delta U'$ per un bacino con un tetto giardino di 100m²)

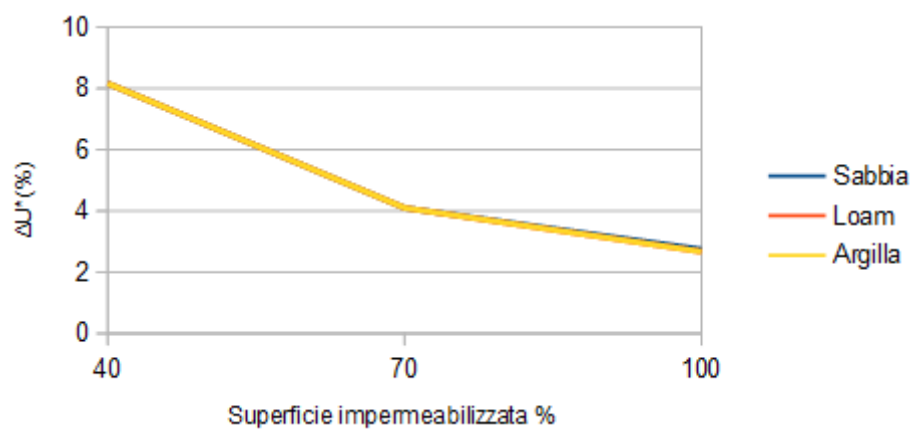
$\Delta U'$				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Asfalto poroso (100m ²)		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	3,1746	1,5945	1,0687
	Loam	3,1746	1,5945	1,0687
	Argilla	3,1746	1,5945	1,0687
		40	70	100
100	Sabbia	3,3934	1,6489	1,1024
	Loam	3,3934	1,6489	1,1024
	Argilla	3,3445	1,7055	1,2292
		40	70	100
150	Sabbia	3,3218	1,6649	0,8573
	Loam	3,2823	1,6729	1,1370
	Argilla	3,9413	2,1093	1,5167

(Tab. 2.10c, valori di $\Delta U'$ coefficiente udometrico per un bacino con asfalto poroso esteso 100m²)

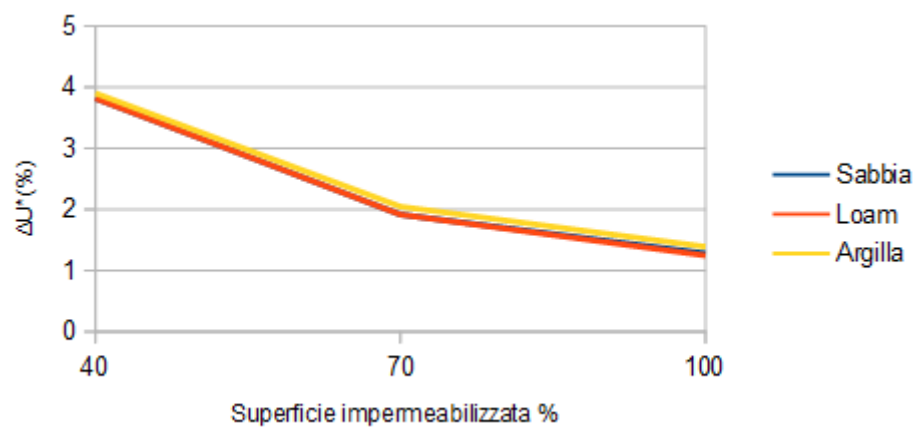
$\Delta U'$				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Vasca di laminazione (10m ²)		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	24,2630	12,1868	7,5573
	Loam	24,2630	12,1868	7,5573
	Argilla	24,2630	12,1868	7,5573
		40	70	100
100	Sabbia	11,3468	5,6383	3,5206
	Loam	11,3468	5,6383	3,5206
	Argilla	11,7057	5,9693	3,9255
		40	70	100
150	Sabbia	7,3356	3,6420	2,3170
	Loam	7,6586	3,9033	2,5840
	Argilla	9,4409	4,9377	3,4471

(Tab. 2.10d, valori di $\Delta U'$ per un bacino con una vasca di laminazione di 10m²)

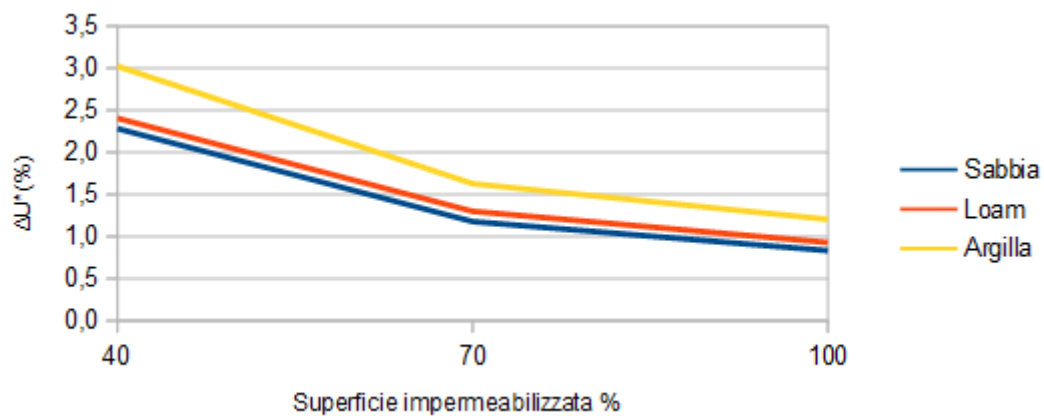
Il parametro $\Delta U'$ viene poi espresso in percentuale e la sua variazione all'aumentare dell'impermeabilizzazione viene mostrata graficamente in Fig. 2.21:



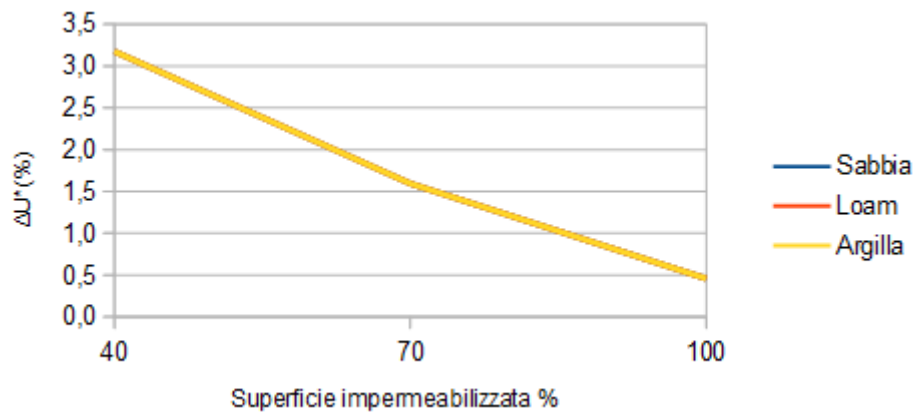
(Fig. 2.21a, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con la trincea, per intensità di pioggia di 50mm/h)



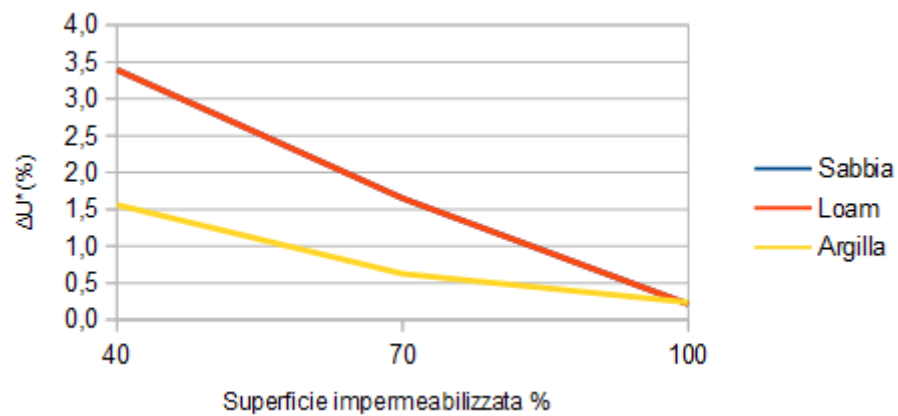
(Fig. 2.21b, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con la trincea, per intensità di pioggia di 100mm/h)



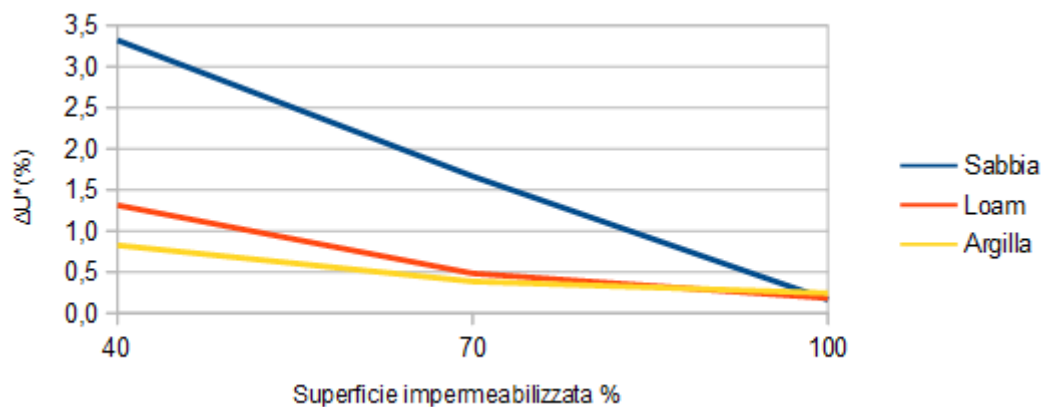
(Fig. 2.21c, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con la trincea, per intensità di pioggia di 150mm/h)



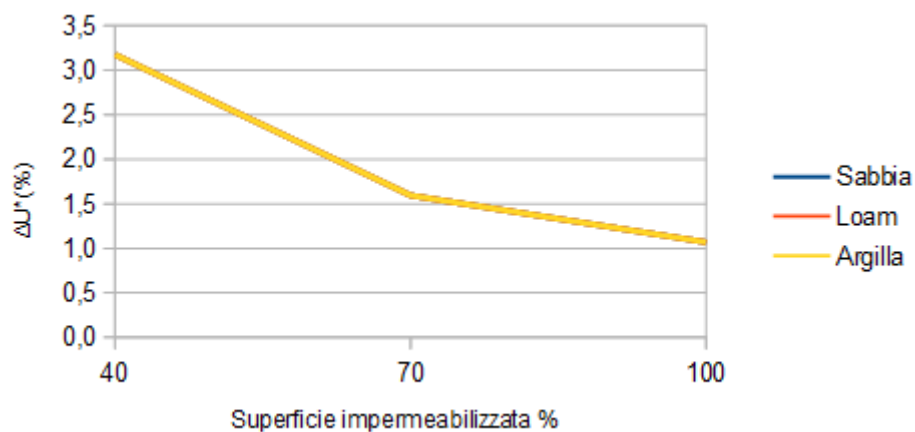
(Fig. 2.21d, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con il tetto giardino, per intensità di pioggia di 50mm/h)



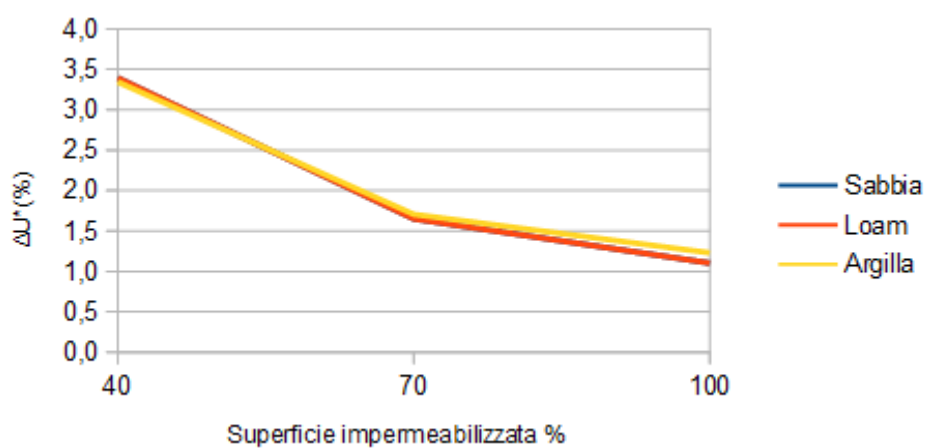
(Fig. 2.21e, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con il tetto giardino, per intensità di pioggia di 100mm/h)



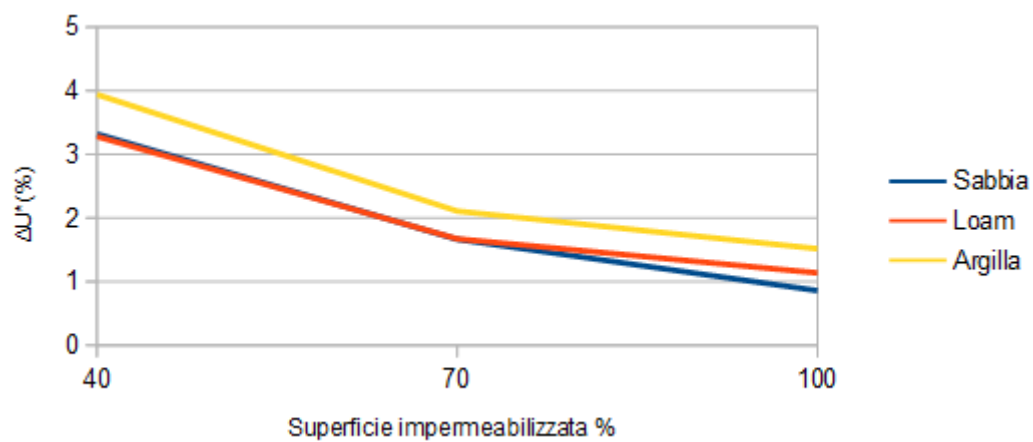
(Fig. 2.21f, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con il tetto giardino, per intensità di pioggia di 150mm/h)



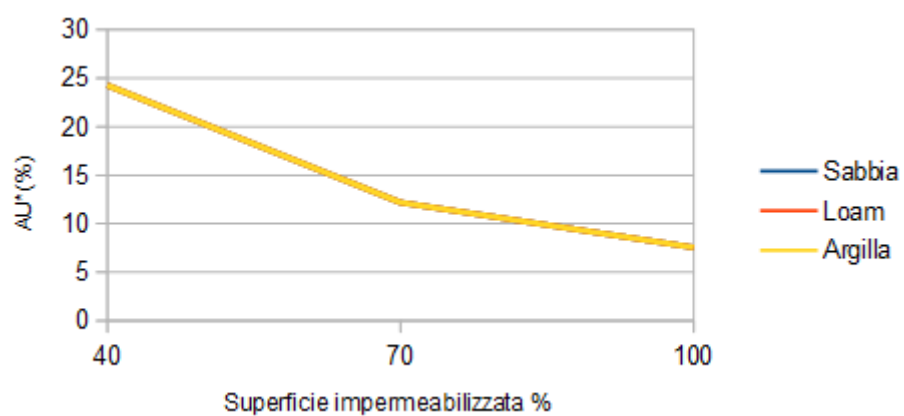
(Fig. 2.21g, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con l'asfalto poroso, per intensità di pioggia di 50mm/h)



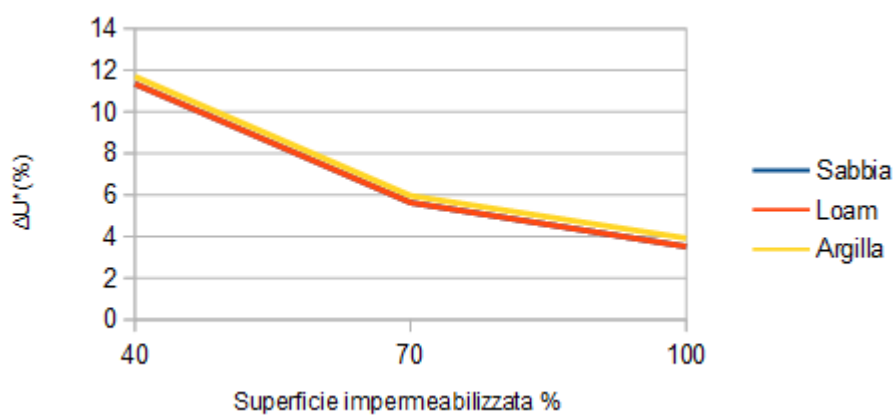
(Fig. 2.21h, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con l'asfalto poroso, per intensità di pioggia di 100mm/h)



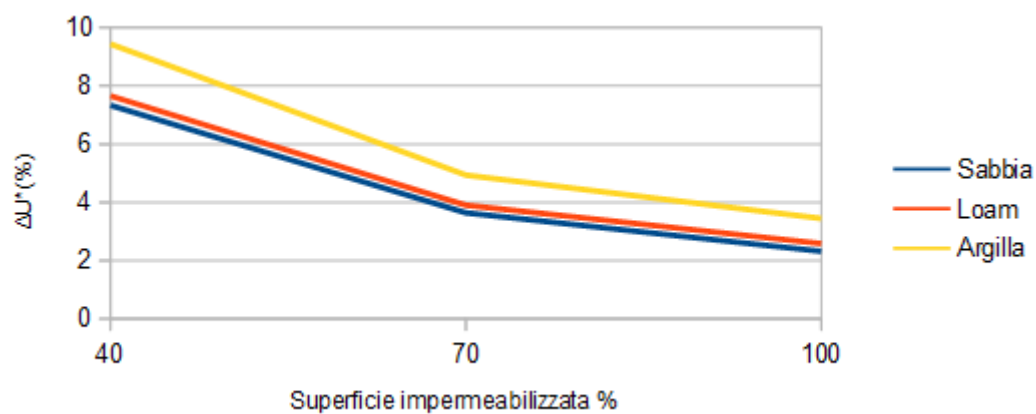
(Fig. 2.21i, variazione di $\Delta U'$ nel bacino con l'asfalto poroso, per intensità di pioggia di 150mm/h)



(Fig. 2.21l, variazione di ΔU^* nel bacino con la vasca, per intensità di pioggia di 50mm/h)



(Fig. 2.21m, variazione di ΔU^* nel bacino con la vasca, per intensità di pioggia di 100mm/h)



(Fig. 2.21n, variazione di ΔU^* nel bacino con la vasca, per intensità di pioggia di 150mm/h)

Come si può osservare per intensità di pioggia di 50mm/h, il comportamento dei bacini è indipendente dalla tipologia di terreno presente. Ciò avviene perchè i terreni meno permeabili sono comunque in grado di assorbire l'intero volume di pioggia. Pertanto in questo caso, l'incremento di deflusso a valle è da addebitarsi interamente alla superficie impermeabile del bacino.

Per intensità di pioggia maggiori, si osserva una differente risposta al variare della tipologia di terreno presente nel bacino. Con la trincea d'infiltrazione e la vasca di laminazione (Fig. 2.21c, 2.21n), ciò segnala l'incapacità dei terreni meno permeabili di infiltrare l'intero volume d'acqua. In particolare, si evidenzia come $\Delta U'$ tenda ad essere maggiore per il terreno argilloso, seguito dal loam ed infine, dal terreno sabbioso. E' quindi chiaro che l'utilizzo di un LID in terreni poco permeabili contribuisce all'invarianza in maniera maggiore rispetto ai terreni più permeabili. Alternativamente, ciò può essere spiegato tramite il coefficiente udometrico U_{10} , che rappresenta il valore da raggiungere per l'invarianza idraulica, e che è maggiore nei terreni argillosi. Infatti, un bacino pre-costruzione in cui sia presente terreno poco permeabile ha valori di deflusso superiori rispetto a quelli dello stesso bacino con terreno permeabile, ovvero l'invarianza idraulica nel terreno argilloso si raggiunge per valori più alti del coefficiente udometrico rispetto a quelli necessari nel terreno sabbioso. Il parametro $\Delta U'$ tende a ridursi all'aumentare della superficie impermeabilizzata, il che come ci si può aspettare, indica la necessità di inserire LID di maggiore estensione per il raggiungimento dell'invarianza idraulica.

Il parametro $\Delta U'$ per l'asfalto poroso, si comporta in larga parte analogamente a quanto visto per la trincea d'infiltrazione e la vasca di laminazione, ma si può notare

come le curve per diverse tipologie di terreni non siano più parallele (Fig. 2.21i), e ciò è legato ai ridotti volumi d'acqua raccolti da questo LID, poichè non agisce come nodo del sistema di drenaggio (come per la trincea e la vasca) e non ha associata una percentuale di superficie impermeabile da drenare. Infatti l'asfalto poroso ha soltanto la possibilità di raccogliere le acque meteoriche che cadono direttamente sulla sua superficie, e le acque che defluiscono naturalmente dalle superfici circostanti.

Questo fenomeno può essere meglio osservato nei risultati del tetto giardino (Fig. 2.21f), dove si assiste ad un $\Delta U'$ superiore per il terreno sabbioso. Questo LID, essendo posto in quota e isolato dal resto del bacino, raccoglie solo le acque meteoriche cadenti direttamente sulla sua superficie. Pertanto, un tetto giardino di 100m² posto in un bacino di un ettaro (10000m²), potrà al massimo raccogliere volumi d'acqua pari al rapporto tra la superficie del LID e la superficie del bacino, che in questo caso è l'1%. I risultati sono quindi minimamente influenzati dalla prestazione del tetto giardino in se, e principalmente legati al procedimento di inserimento dei LID esposto precedentemente, che avviene sostituendo superficie impermeabile. Nei dati quindi, il tetto giardino è particolarmente rappresentato dalla sostituzione della copertura impermeabile più che dalla sua efficacia di gestire deflusso, e ciò spiega i valori più alti di $\Delta U'$ per i terreni sabbiosi. Infatti, impermeabilizzare un terreno permeabile ha più impatto nella generazione di deflusso rispetto ad un terreno poco permeabile, e viceversa, la sostituzione di una superficie impermeabile in un terreno sabbioso con il tetto giardino (che è permeabile) porta ad offrire benefici maggiori rispetto a quelli che si sarebbero ottenuti nel terreno argilloso.

CAPITOLO 3

In questo capitolo viene svolta l'analisi economica dei LID, con l'obiettivo di associare il loro contributo all'invarianza idraulica ad un prezzo. Si vuole quindi ottenere per i bacini soggetti ad impermeabilizzazione crescente, il costo necessario a bilanciare l'incremento di deflusso, sia per singoli LID che per schemi di drenaggio misti.

Quest'analisi viene svolta con gli stessi bacini ed eventi piovosi utilizzati in precedenza, nonché gli stessi LID. Tramite il parametro $\Delta U'$ è possibile ricavare l'estensione di ogni LID necessaria al raggiungimento dell'invarianza idraulica. Conseguentemente, dopo aver effettuato una stima unitaria dei sistemi di drenaggio, è possibile ricavare il costo da sostenere affinché i bacini nelle loro varie configurazioni possano tornare alle condizioni pre-costruzione.

3.1 - Stima unitaria dei LID

Il calcolo fa riferimento alla nozione del "whole life cost", ovvero il costo complessivo dei LID, comprendente i costi di costruzione, esercizio e manutenzione. Per ogni sistema di drenaggio vengono utilizzati gli schemi costruttivi già presentati nel capitolo 2 per il calcolo dei costi di costruzione. Viene ipotizzata per i vari LID una vita utile di 15 anni, ed il costo di esercizio e manutenzione viene stimato pari al 30% del costo di costruzione, come suggerito dalla normativa della Regione Lombardia.

I prezzi utilizzati per i materiali e la manodopera sono tratti dal "Prezzario regionale

lavori pubblici" della Regione Marche, ed includono il costo della sicurezza, il trasporto dei materiali, la rimozione delle normali sovrastrutture o simili e quant'altro occorre per dare il lavoro finito.

Il costo unitario viene riferito al metro quadro poichè è l'unità di misura utilizzata da SWMM per le superfici dei LID e legata al valore di $\Delta U'$. I valori trovati vengono esposti nelle tabelle (Tab. 3.1):

Trincea d'infiltrazione (1m ²)			
Tipologie di lavorazioni	Costo unitario	Quantità necessarie	Costo
Scavo a sezione obbligata fino a 1.5m	11,70 €/m ³	1,3 m ³	15,21
Riempimento terreno vegetale	6,30 €/m ³	0,1 m ³	0,63
Riempimento sabbia	47,12 €/m ³	0,2 m ³	9,42
Drenaggio con ghiaia	19,60 €/m ³	1 m ³	19,6
Geotessuto	3,81 €/m ²	4 m ²	15,24
	Costo di costruzione totale (€)		60,1
	Costo di esercizio e manutenzione (€)		18,03
	Costo totale (€)		78,14

(Tab 3.1a, calcolo del costo di una trincea d'infiltrazione al metro quadro)

Asfalto poroso (1m ²)			
Tipologie di lavorazioni	Costo unitario	Quantità necessarie	Costo
Scavo di sbancamento	4,08 €/m ³	0,45 m ³	1,84
Conglomerato bituminoso	258,02 €/m ³	0,1 m ³	25,8
Riempimento sabbia	47,12 €/m ³	0,05 m ³	2,36
Drenaggio con ghiaia	19,60 €/m ³	0,3 m ³	5,88
Geotessuto	3,81 €/m ²	2 m ²	7,62
	Costo di costruzione totale (€)		43,49
	Costo di esercizio e manutenzione (€)		13,05
	Costo totale (€)		56,54

(Tab 3.1b, calcolo del costo dell'asfalto poroso al metro quadro)

Tetto giardino (1m ²)			
Tipologie di lavorazioni	Costo unitario	Quantità necessarie	Costo
Semina di prato	0,67 €/m ²	1 m ²	0,67
Riempimento terreno vegetale	6,30 €/m ³	0,1 m ³	0,63
Elemento di drenaggio	19,44 €/m ²	1 m ³	19,6
Geotessuto	3,81 €/m ²	1 m ²	3,81
	Costo di costruzione totale (€)		24,71
	Costo di esercizio e manutenzione (€)		7,41
	Costo totale (€)		32,12

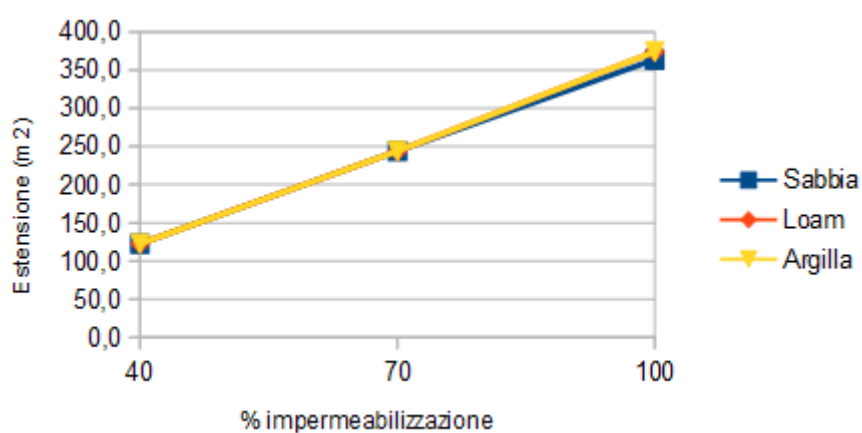
(Tab 3.1c, calcolo del costo del tetto giardino al metro quadro)

Vasca di laminazione (1m ²)			
Tipologie di lavorazioni	Costo unitario	Quantità necessarie	Costo
Scavo di sbancamento	4,08 €/m ³	1 m ³	15,21
Vasca prefabbricata in calcestruzzo	217,02 €/m ³	1 m ³	217,02
	Costo di costruzione totale (€)		232,23
	Costo di esercizio e manutenzione (€)		69,67
	Costo totale (€)		301,9

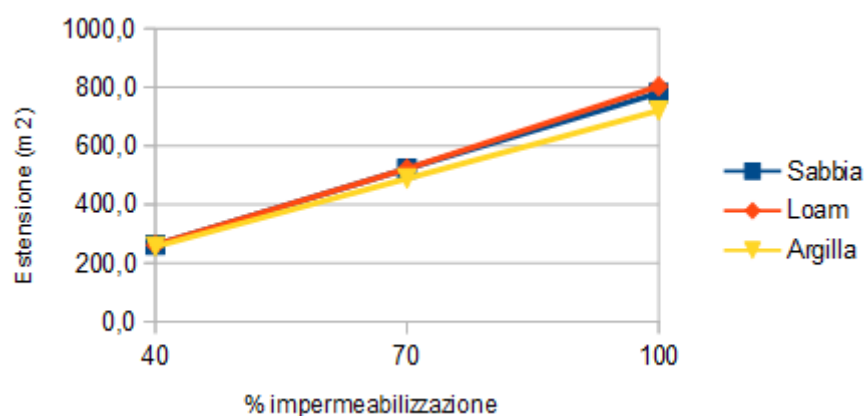
(Tab 3.1d, calcolo del costo della vasca di laminazione al metro quadro)

3.2 – Estensione LID

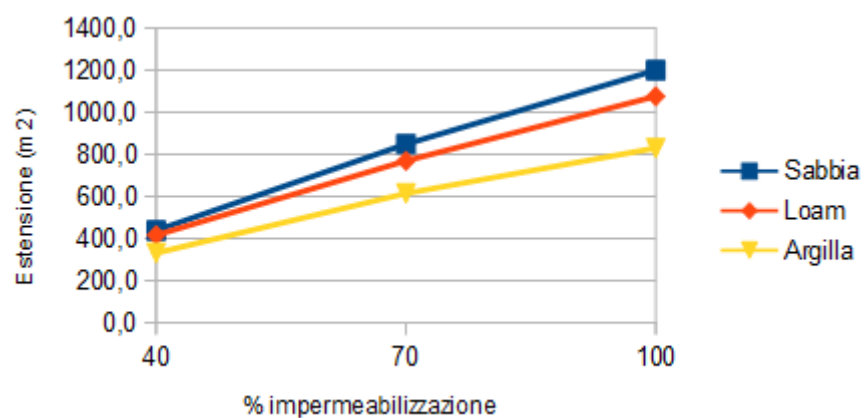
Si utilizza il parametro $\Delta U'$ calcolato in precedenza, che è legato al valore di superficie dei LID utilizzato nell'analisi, per calcolare l'estensione dei sistemi di gestione necessaria ad ottenere l'invarianza idraulica nei vari scenari. Mantenendo fisso il quantitativo di deflusso di ogni scenario, si incrementa la superficie dei LID fino al suo completo assorbimento. I risultati vengono mostrati in (Fig. 3.1).



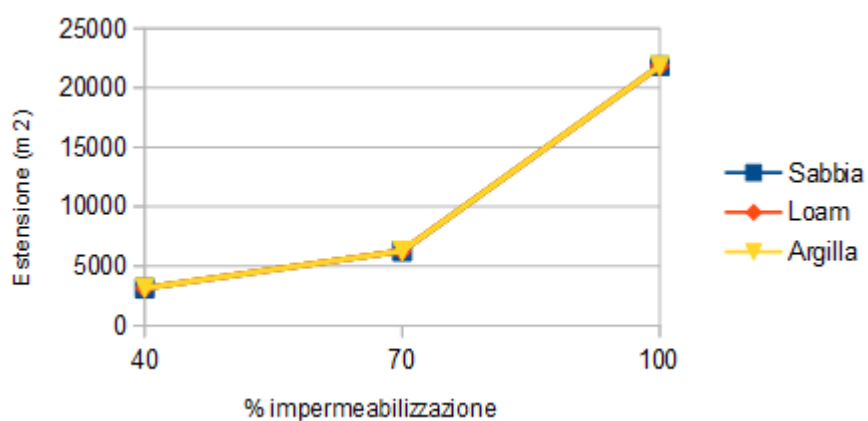
(Fig 3.1a, estensione trincea per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 50mm/h)



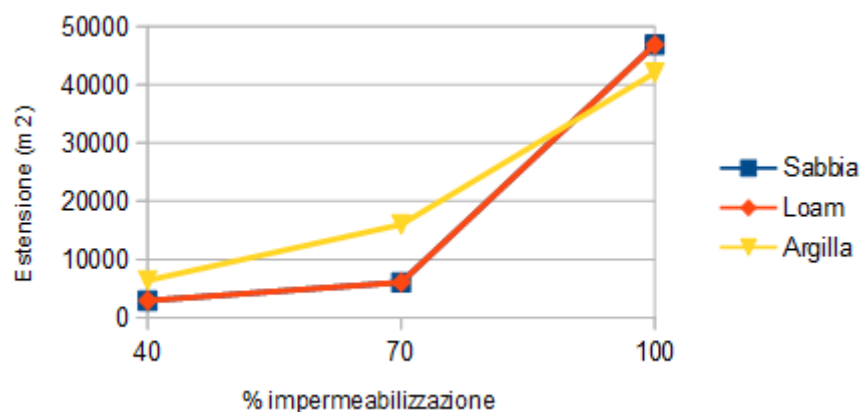
(Fig 3.1b, estensione trincea per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 100mm/h)



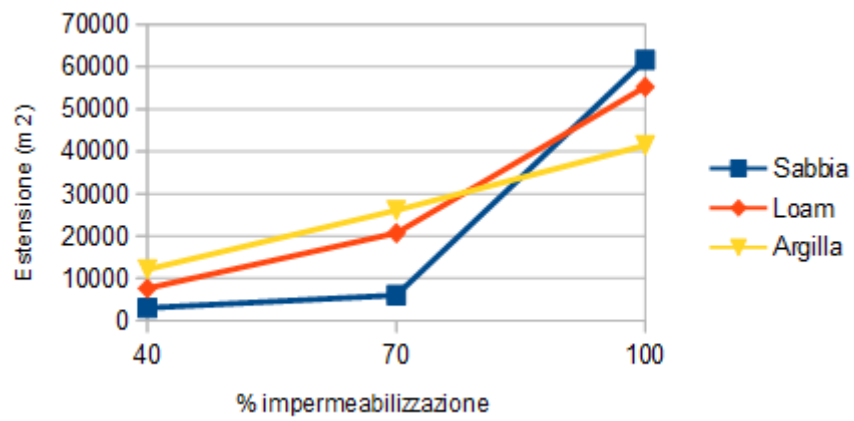
(Fig 3.1c, estensione trincea per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 150mm/h)



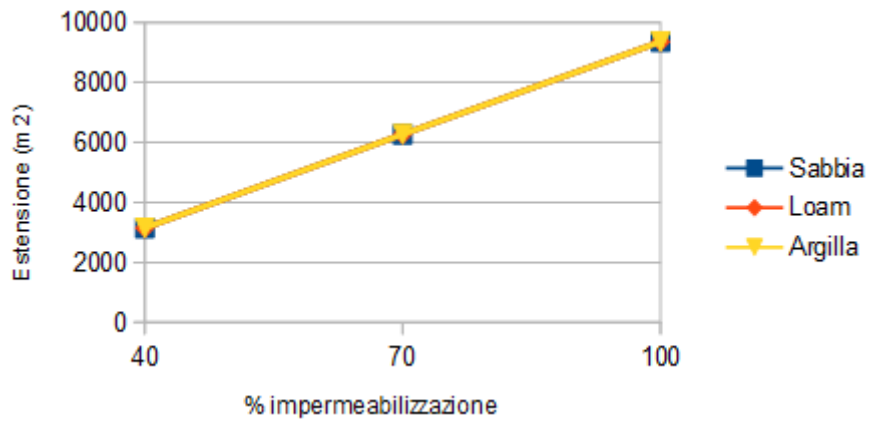
(Fig 3.1d, estensione tetto giardino per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 50mm/h)



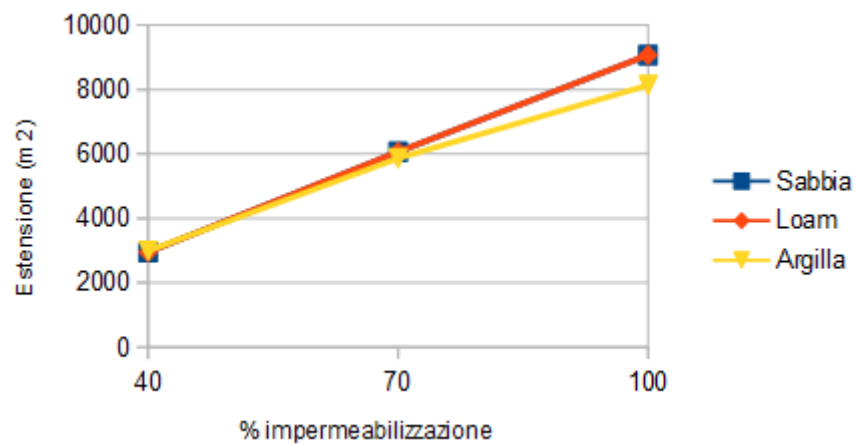
(Fig 3.1e, estensione tetto giardino per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 100mm/h)



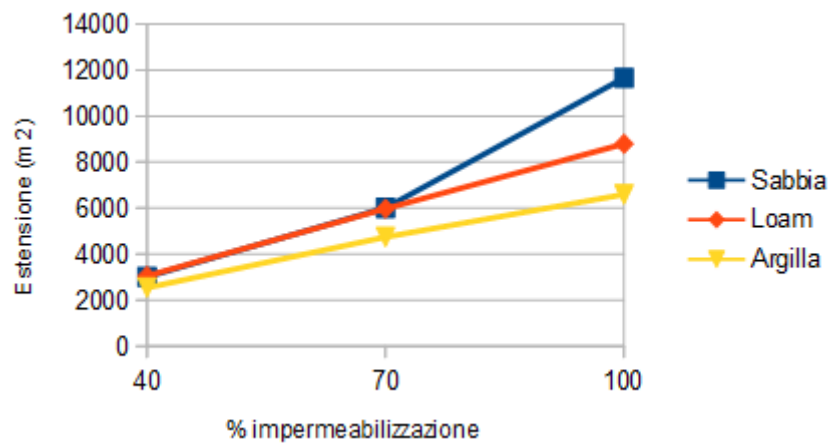
(Fig 3.1f, estensione tetto giardino per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 150mm/h)



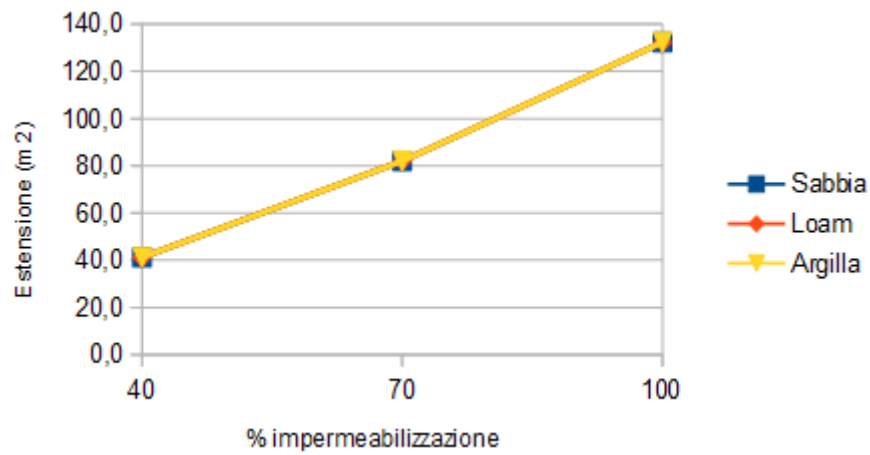
(Fig 3.1g, estensione asfalto poroso per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 50mm/h)



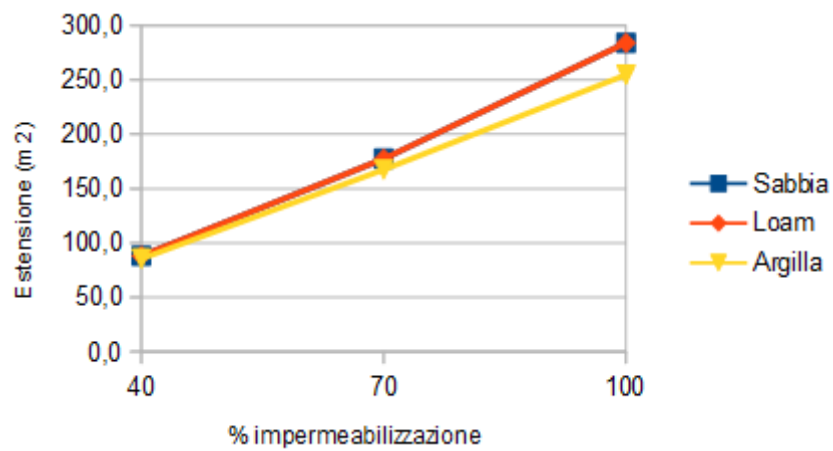
(Fig 3.1h, estensione asfalto poroso per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 100mm/h)



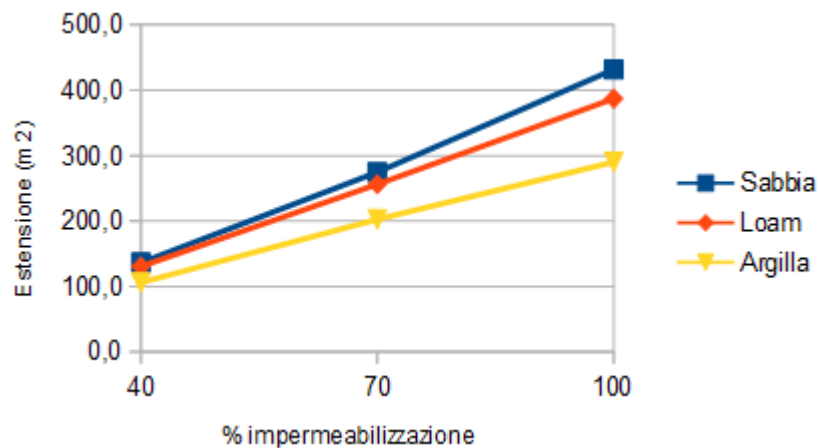
(Fig 3.1i, estensione asfalto poroso per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 150mm/h)



(Fig 3.1l, estensione vasca per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 50mm/h)



(Fig 3.1m, estensione vasca per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 100mm/h)



(Fig 3.1n, estensione vasca per l'invarianza idraulica, con intensità di pioggia 150mm/h)

Si può notare come l'inserimento di LID tenda ad essere più efficiente, in quanto a superficie occupata e a parità di altre condizioni, per bacini argillosi . Ciò è la diretta conseguenza dei risultati ottenuti nel capitolo 2, dove si è visto tramite il parametro $\Delta U'$ che l'efficacia di un LID è maggiore nei bacini costituiti da terreno poco permeabile. Questo è particolarmente pronunciato per intensità di pioggia elevate, viceversa, per precipitazioni meno intense non ci sono significative differenze tra bacini con terreni diversi.

Come osservabile in Fig. 3.1f e 3.1i, per alcuni scenari con tetto giardino e trincea d'infiltrazione, l'estensione necessaria supera quella del bacino e dimostra come l'esclusivo utilizzo di questi LID renda impossibile l'assorbimento del deflusso presente nei rispettivi casi e di conseguenza il raggiungimento dell'invarianza idraulica.

3.3 – Costo dell'invarianza idraulica

Moltiplicando l'estensione per il costo unitario dei LID è possibile calcolare il costo totale per l'ottenimento dell'invarianza idraulica in ogni bacino. Per praticità, si è preferito calcolare il costo per ottenere il contributo dell'1% dell'invarianza idraulica. Questo valore è stato ottenuto moltiplicando i costi unitari con le superfici dei LID utilizzate in SWMM, e dividendo per la relativa percentuale di ΔU . I risultati sono mostrati in (Tab 3.2).

Costo per punto percentuale di ΔU (€)				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Trincea d'infiltrazione		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	95,72	190,56	284,33
	Loam	95,72	190,56	292,45
	Argilla	95,72	190,56	292,45
		40	70	100
100	Sabbia	204,67	408,04	610,32
	Loam	204,67	408,04	627,76
	Argilla	200,25	381,78	563,02
		40	70	100
150	Sabbia	342,14	662,54	936,75
	Loam	324,62	600,52	839,95
	Argilla	258,32	479,38	647,63

(Tab. 3.2a, costo per l'1% del contributo all'invarianza idraulica per la trincea)

Costo per punto percentuale di ΔU (€)				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Tetto giardino		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	1011,87	2014,57	7013,52
	Loam	1011,87	2014,57	7013,52
	Argilla	1011,87	2014,57	7013,52
		40	70	100
100	Sabbia	946,62	1948,10	15054,98
	Loam	946,62	1948,10	15054,98
	Argilla	2058,17	5136,76	13502,37
		40	70	100
150	Sabbia	967,04	1929,39	19806,12
	Loam	2446,70	6646,99	17759,43
	Argilla	3894,02	8376,07	13312,69

(Tab. 3.2b, costo per l'1% del contributo all'invarianza idraulica per il tetto giardino)

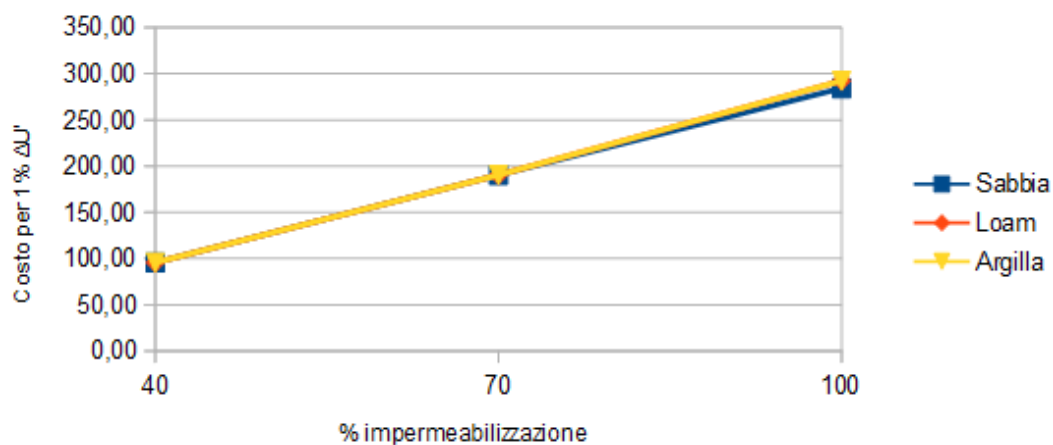
Costo per punto percentuale di $\Delta U'$ (€)				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Asfalto poroso		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	1781,08	3546,00	5290,73
	Loam	1781,08	3546,00	5290,73
	Argilla	1781,08	3546,00	5290,73
		40	70	100
100	Sabbia	1666,23	3429,01	5128,92
	Loam	1666,23	3429,01	5128,92
	Argilla	1690,61	3315,26	4599,98
		40	70	100
150	Sabbia	1702,16	3396,07	6595,57
	Loam	1722,65	3379,97	4973,14
	Argilla	1434,59	2680,61	3727,93

(Tab. 3.2c, costo per l'1% del contributo all'invarianza idraulica per l'asfalto poroso)

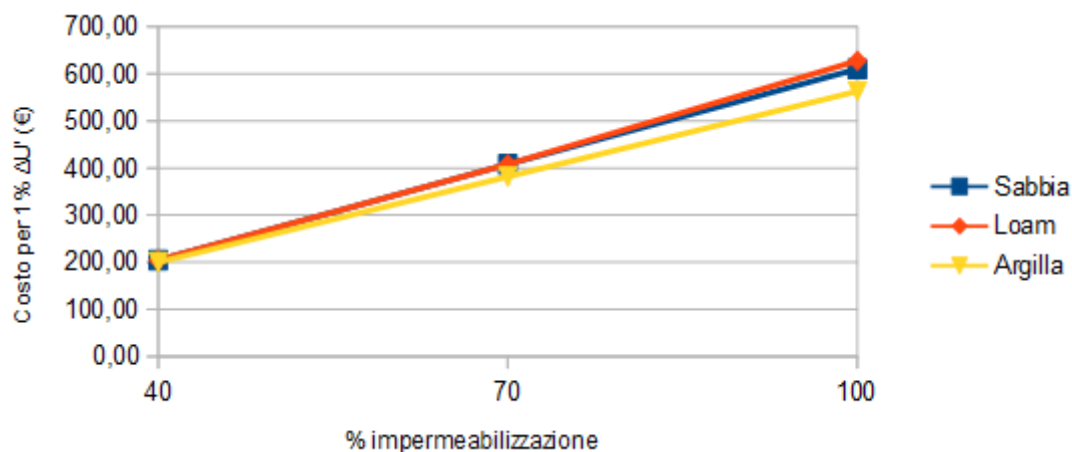
Costo per punto percentuale di $\Delta U'$ (€)				
Intensità di pioggia (mm/h)	Tipo di terreno	Vasca di laminazione		
		Superficie Impermeabile (%)		
		40	70	100
50	Sabbia	124,43	247,73	399,48
	Loam	124,43	247,73	399,48
	Argilla	124,43	247,73	399,48
		40	70	100
100	Sabbia	266,07	535,44	857,52
	Loam	266,07	535,44	857,52
	Argilla	257,91	505,75	769,08
		40	70	100
150	Sabbia	411,55	828,93	1303,00
	Loam	394,19	773,44	1168,35
	Argilla	319,78	611,42	875,81

(Tab. 3.2d, costo per l'1% del contributo all'invarianza idraulica per la vasca di laminazione)

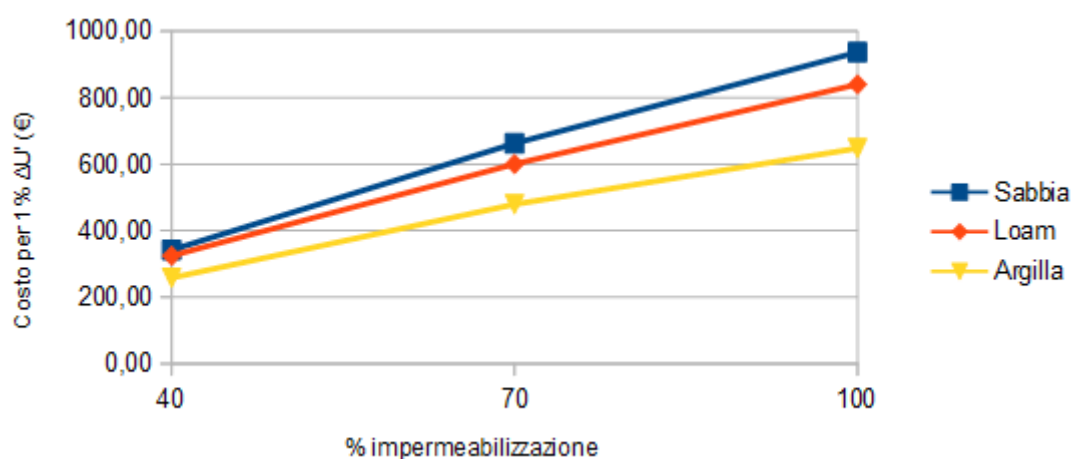
Questi valori, vengono rappresentati nei grafici di (Fig. 3.2), suddivisi per tipologia di LID e intensità di pioggia, e mostrando la variazione del costo al crescere dell'impermeabilizzazione:



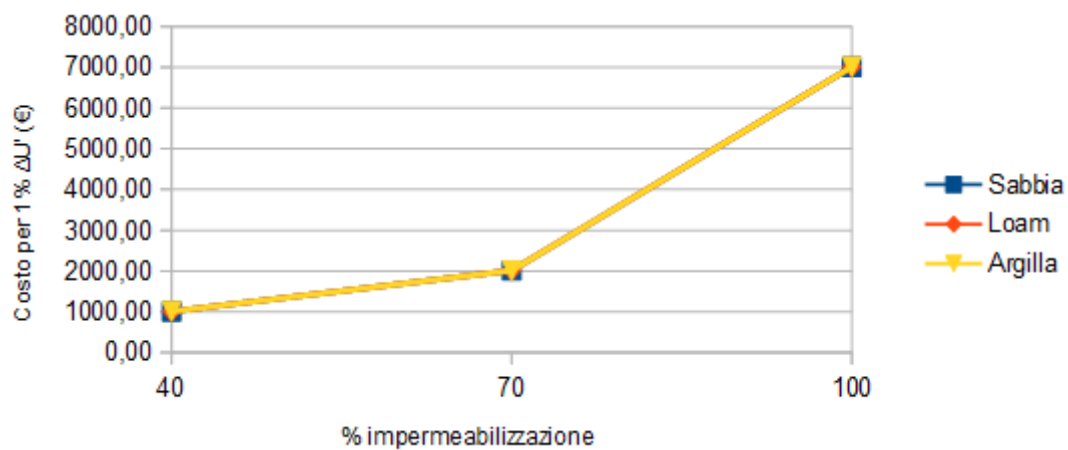
(Fig. 3.2a, costo dell'1% di $\Delta U'$ per la trincea d'infiltrazione con intensità di pioggia di 50mm/h)



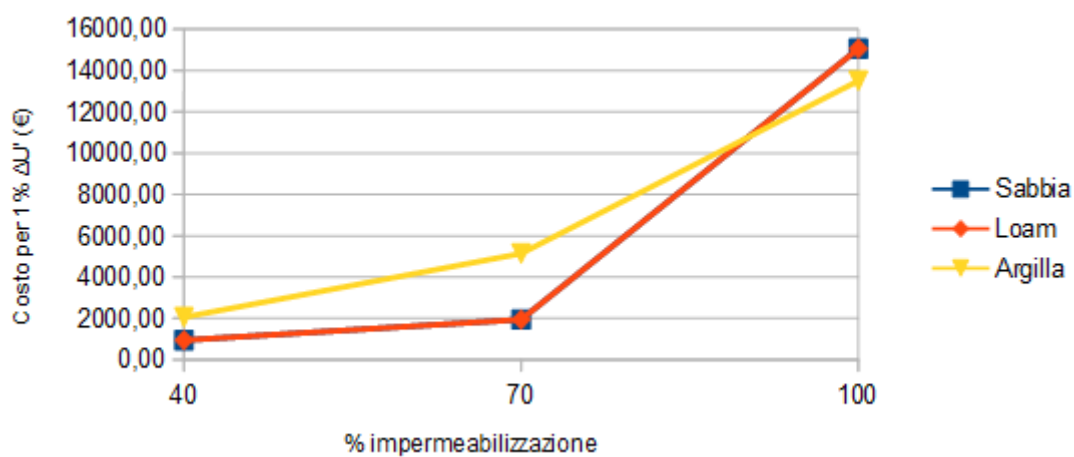
(Fig. 3.2b, costo dell'1% di $\Delta U'$ per la trincea d'infiltrazione con intensità di pioggia di 100mm/h)



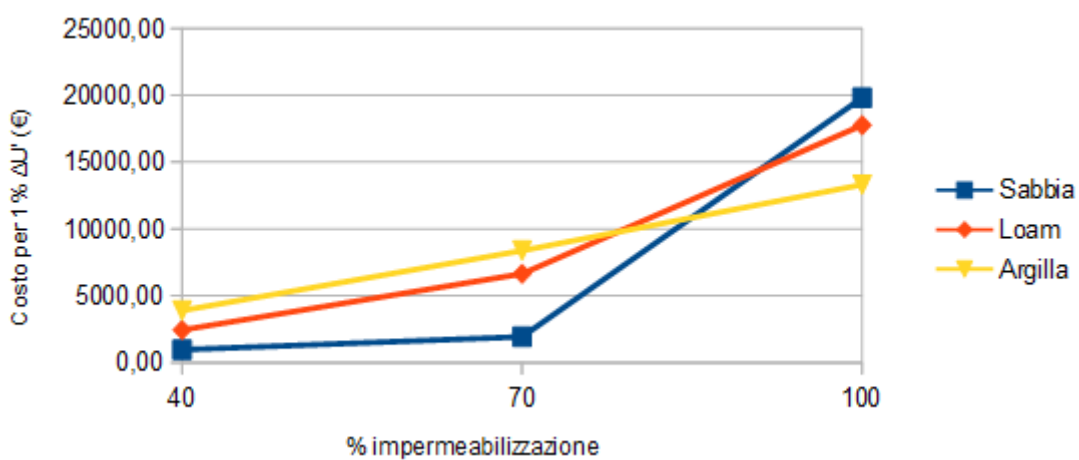
(Fig. 3.2c, costo dell'1% di $\Delta U'$ per la trincea d'infiltrazione con intensità di pioggia di 150mm/h)



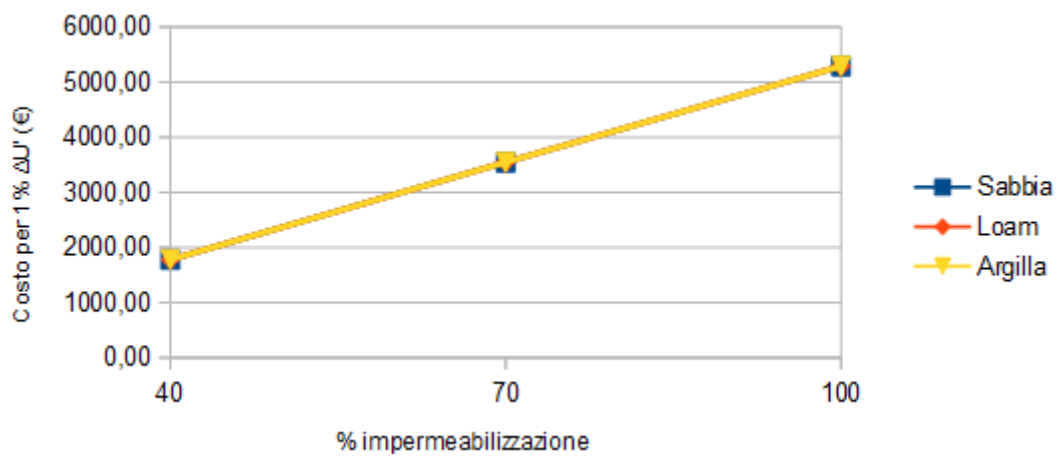
(Fig. 3.2d, costo dell'1% di $\Delta U'$ per il tetto giardino con intensità di pioggia di 50mm/h)



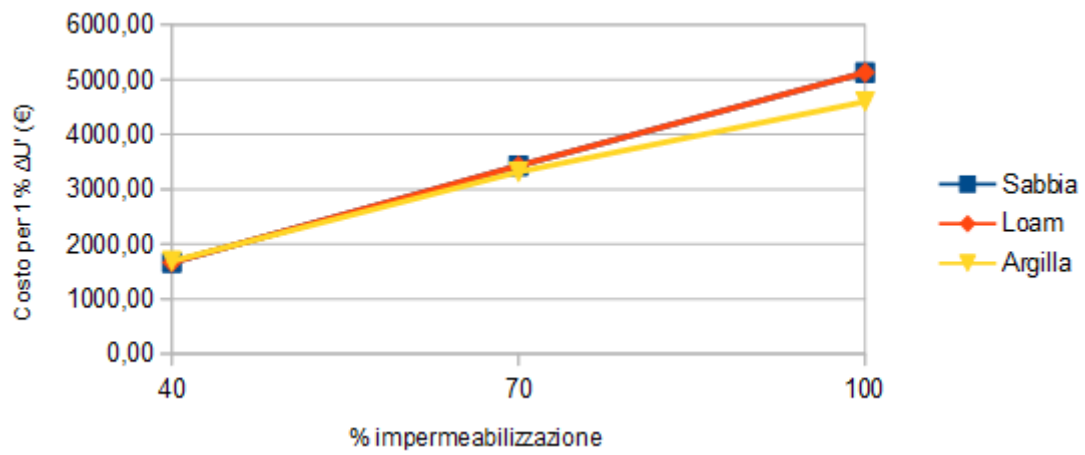
(Fig. 3.2e, costo dell'1% di $\Delta U'$ per il tetto giardino con intensità di pioggia di 100mm/h)



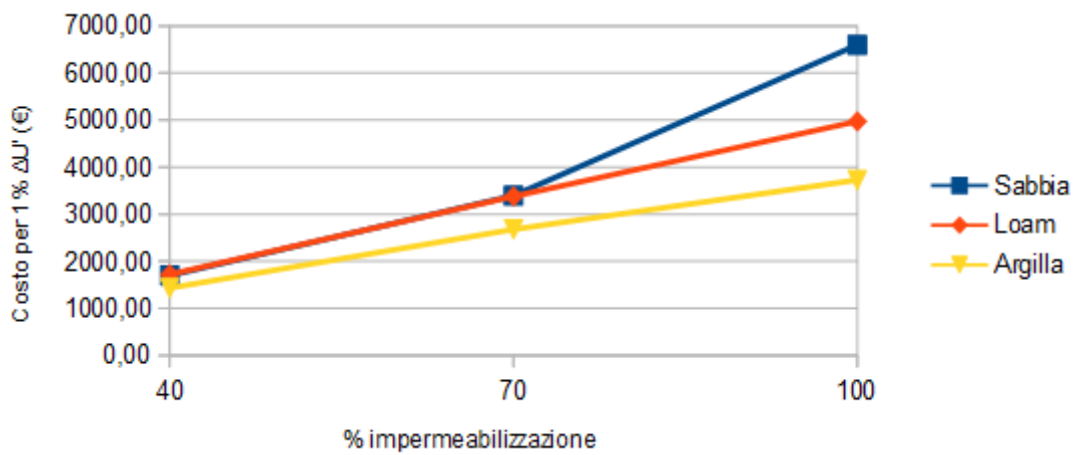
(Fig. 3.2f, costo dell'1% di $\Delta U'$ per il tetto giardino con intensità di pioggia di 150mm/h)



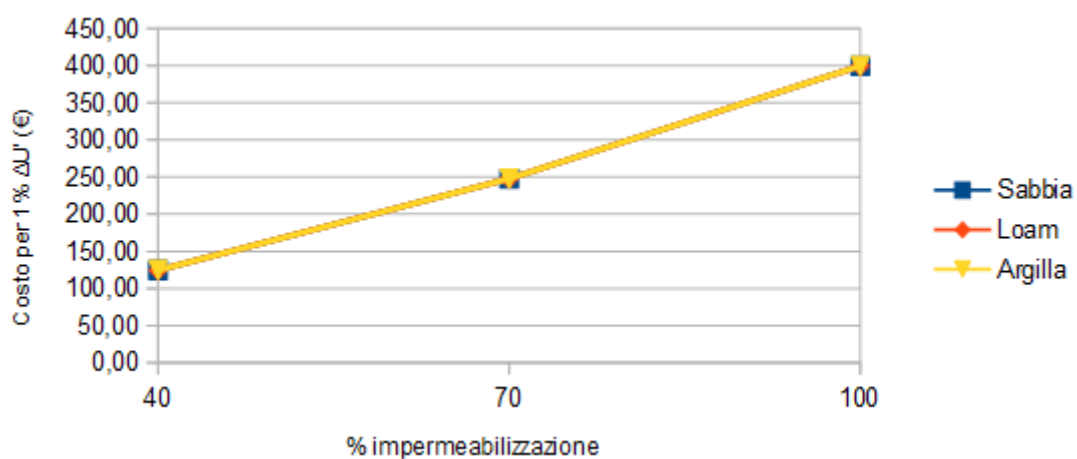
(Fig. 3.2g, costo dell'1% di $\Delta U'$ per l'asfalto poroso con intensità di pioggia di 50mm/h)



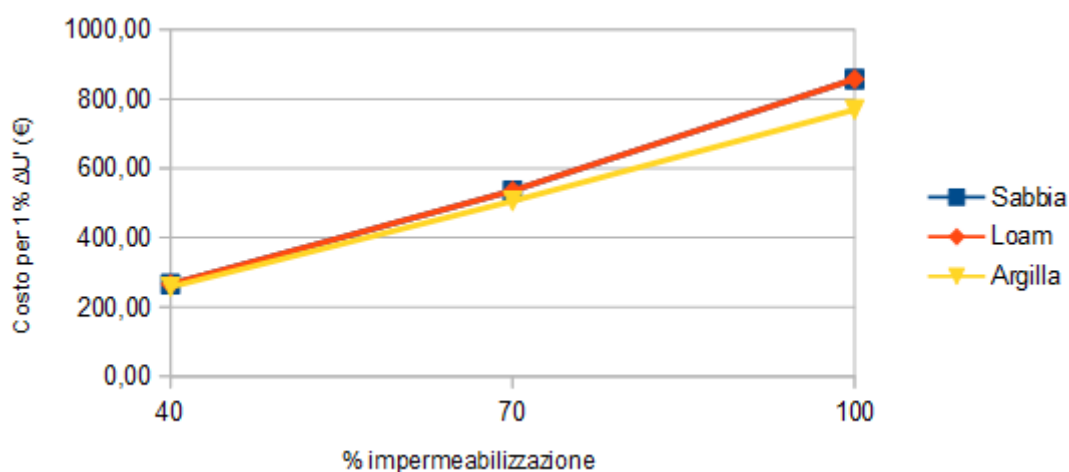
(Fig. 3.2h, costo dell'1% di $\Delta U'$ per l'asfalto poroso con intensità di pioggia di 100mm/h)



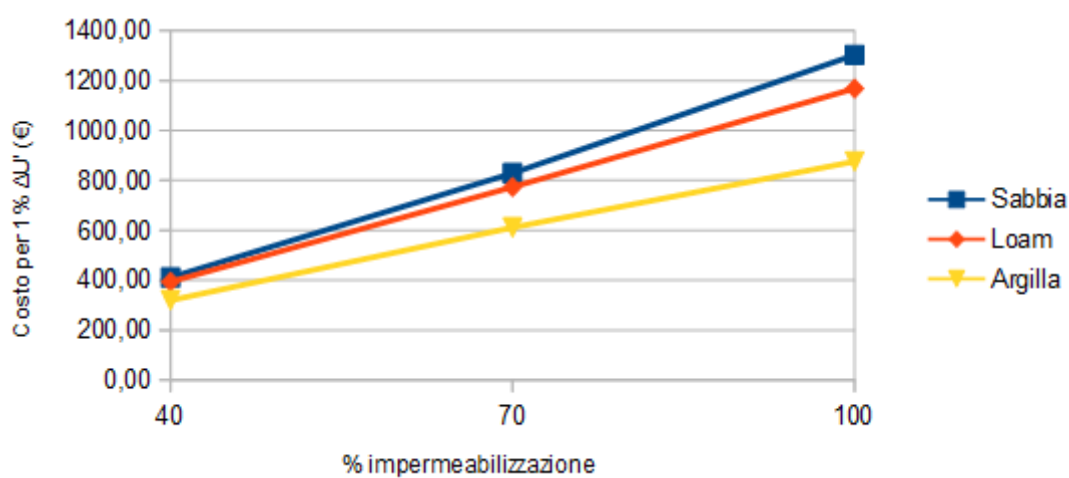
(Fig. 3.2i, costo dell'1% di $\Delta U'$ per l'asfalto poroso con intensità di pioggia di 150mm/h)



(Fig. 3.2l, costo dell'1% di $\Delta U'$ per la vasca di laminazione con intensità di pioggia di 50mm/h)



(Fig. 3.2m, costo dell'1% di $\Delta U'$ per la vasca di laminazione con intensità di pioggia di 100mm/h)



(Fig. 3.2n, costo dell'1% di $\Delta U'$ per la vasca di laminazione con intensità di pioggia di 150mm/h)

Come si può osservare dai dati, per intensità di piogge maggiori, il costo dell'invarianza idraulica tende ad essere minore in bacini con terreni poco impermeabili, e ciò è in linea con i risultati ricavati precedentemente che affermavano una maggiore efficacia dei LID in questa circostanza. Una maggiore efficacia corrisponde alla necessità di una minore estensione del LID, e conseguentemente un costo di realizzazione inferiore.

Si può inoltre notare come il costo di un tetto giardino o di un'asfalto poroso siano significativamente maggiori rispetto a quelli della trincea e della vasca. Queste ultime infatti agiscono come nodi del sistema di drenaggio e ciò offre loro consistenti volumi d'acqua da gestire, e permettendo di mantenere un regime di funzionamento alto. Inoltre, esse offrono significativi volumi di laminazione per metro quadro, necessitando un'estensione contenuta a parità di contributo all'invarianza rispetto alle altre soluzioni. Ciò rende questi LID molto efficienti dal punto di vista dei costi, e preferibili per il perseguimento dell'invarianza idraulica.

Va detto che nonostante le prestazioni inferiori, il tetto giardino e l'asfalto poroso rimangono delle soluzioni valide in molti contesti. Infatti, queste considerazioni sono state fatte unicamente rispetto al raggiungimento dell'invarianza idraulica e non tengono conto degli aspetti funzionali o estetici di un LID, che sono minimi per la trincea e la vasca, ma notevoli per il tetto giardino e l'asfalto poroso, e che possono in base alle circostanze, giustificare il maggiore costo.

3.4 – Scenari di drenaggio

Si vogliono infine calcolare i costi di sistemi di drenaggio che comprendano l'utilizzo di più LID, al fine di offrire una panoramica di quelle che potrebbero essere delle reali distribuzioni di sistemi di gestione dei deflussi in ambito urbano.

Questo viene valutato in una serie di scenari, i quali si riferiscono a quelli utilizzate in precedenza e sono definiti da 3 diverse intensità di pioggia (50, 100, 150mm/h), 3 diverse tipologie di terreno (sabbioso, loam, argilloso), 3 diverse percentuali di superficie del bacino impermeabilizzata (40, 70 e 100%).

Sono state considerate come variabili la superficie di ogni LID da applicare agli scenari, e di conseguenza la superficie impermeabile da drenare assegnata alla trincea e alla vasca. Avendo posto solo queste condizioni ogni scenario potrebbe essere rappresentato da infinite combinazioni di superfici, per cui ci si è indirizzati perseguendo l'obiettivo del minimo costo.

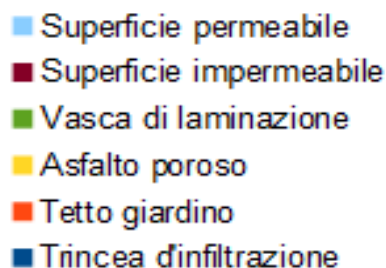
Volendo però garantire una certa presenza anche ai LID meno performanti come il tetto giardino, vengono fissate di conseguenza delle superfici minime e massime:

- Superficie minima del tetto giardino: 100m² (l'1% della superficie del bacino);
- Superficie massima della trincea d'infiltrazione: 100m²;
- Superficie massima della vasca di laminazione: 25m² (corrispondenti a 25m³);

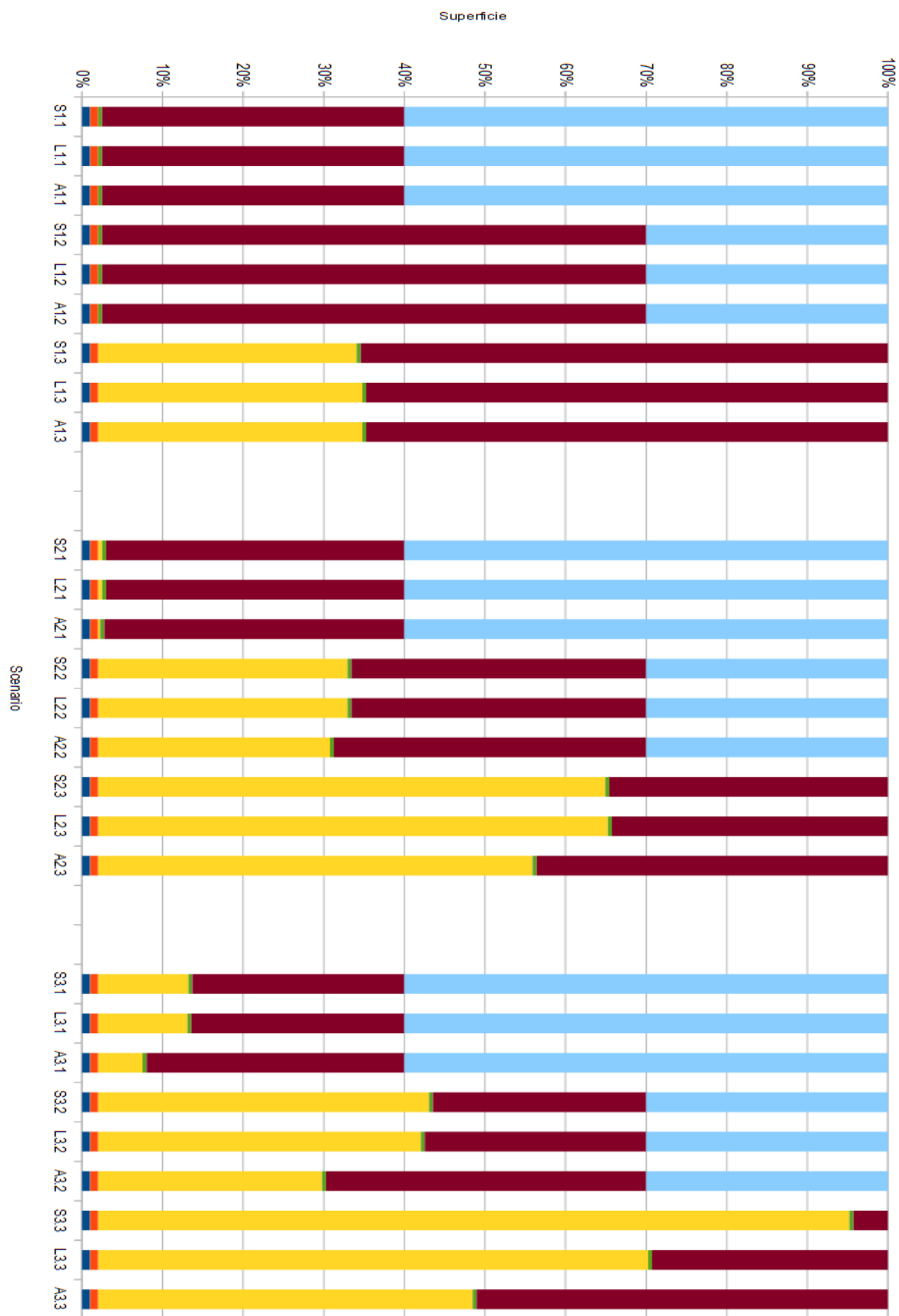
Inoltre vengono posti i seguenti vincoli:

- La somma dei $\Delta U'$ (espressi in percentuale) dovuti all'applicazione dei LID deve essere pari a 100 , in modo da ottenere l'invarianza idraulica in ogni scenario.
- La somma delle superfici impermeabili, permeabili e quelle occupate dai LID, non può essere superiore a 10000m² (superficie del bacino, pari ad un ettaro).

Si ha ora tutto il necessario per procedere con il calcolo della superficie di asfalto poroso e definire così la configurazione completa delle superfici di ogni scenario. Quest'ultimo viene indicato mediante una lettera e due numeri: la lettera rappresenta la tipologia di terreno (S per sabbioso, L per loam, A per argilloso), il primo numero l'intensità di pioggia (1 per 50mm/h, 2 per 100mm/h, 3 per 150mm/h) e il secondo la percentuale di superficie impermeabilizzata (1 per 40%, 2 per 70%, 3 per 100%). I risultati sono infine esposti nel grafico di Fig. 3.3:



(Fig 3.3a, legenda per le superfici presenti nel bacino)



(Fig. 3.3b, occupazione dei LID in ogni scenario per il minimo costo)

CONCLUSIONI

In questo studio si è cercato di comprendere gli effetti della progressiva urbanizzazione di un bacino idrografico, e sono state analizzate delle soluzioni per contrastare l'aumento del deflusso di acque meteoriche in una moltitudine di scenari. Questa casistica è stata generata a partire da un bacino di riferimento, della superficie di un ettaro, sottoponendolo a diverse percentuali di superficie impermeabile, utilizzando tre tipologie di terreno per la porzione permeabile, e variando l'intensità di pioggia. In seguito, in ogni bacino sono stati inseriti quattro tipologie di LID e valutate le relative variazioni di deflusso, attraverso i criteri ed i parametri forniti, al fine di fornire l'effettiva misura della loro capacità prestazionale. Infine, si cerca di stabilire il costo dell'invarianza idraulica associando ai parametri di efficacia dei LID il costo di costruzione, esercizio e manutenzione. L'analisi viene effettuata utilizzando un modello a base fisica (EPA SWMM), che permette la determinazione dei parametri utili ad orientare le scelte legate alla gestione dei deflussi in ambito urbano.

I risultati mostrano come l'impermeabilizzazione è tra le principali cause della crescita del deflusso, incrementando di conseguenza il rischio idrogeologico e comportando costi significativi per le amministrazioni. Per intensità di pioggia significative, si può notare come l'impermeabilizzazione abbia un'impatto minore su bacini con terreni in origine poco permeabile, per via delle già limitate capacità di assorbire deflusso nelle condizioni pre-costruzione.

L'analisi dei LID espone la loro efficacia nei vari scenari oggetto di studio, favorendo soluzioni che agiscono come nodi del sistema di drenaggio, quali la trincea

d'infiltrazione e la vasca di laminazione, in grado di raccogliere e gestire, non solo le acque cadenti sulla propria superficie, ma anche quelle provenienti dal resto del bacino.

Le valutazioni economiche evidenziano la convenienza di queste due soluzioni per il raggiungimento dell'invarianza idraulica, ma va comunque ricordata la validità del tetto giardino e dell'asfalto poroso, i quali offrono valenze funzionali, ambientali ed estetiche che ne rendono comunque valida l'adozione in diverse circostanze.

L'approccio proposto da seguire per l'applicazione del principio di invarianza idraulica tenta di fornire utili indicazioni per la pianificazione territoriale e per le scelte progettuali di sistemi di drenaggio urbano, sia sotto il punto di vista funzionale che economico.

BIBLIOGRAFIA

ASCE, *Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems*, 1992.

Catalbiano F. , La Loggia G., Oliveri E., *Pianificazione a invarianza idraulica: stima economica dell'efficacia di sistemi distribuiti di gestione dei deflussi (BMP) nei bacini urbani*, L'acqua, n°3, 2014.

Chester L. Arnold Jr. & C. James Gibbons, *Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator*, Journal of the American Planning Association, 1996.

ISPRA, Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici, SNPA, 1996.

McCuen, *Hydrology*, Federal Highway Administration, 1996.

Pistocchi A., *L'invarianza idraulica nelle trasformazioni urbanistiche. Un esempio di progettazione idrologica delle trasformazioni urbane*, 2001.

Regione Lombardia, *Regolamento recante criteri e metodi per il rispetto del principio dell'invarianza idraulica ed idrologica ai sensi dell'articolo 58 bis della legge regionale 11 marzo 2005, n. 12 (Legge per il governo del territorio)*, 2017.

Regione Marche, *Prezzario regionale lavori pubblici*, Allegato A, 2020.

Rossman L.A., *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*, 2015.

Soil Conservation Service, *National Engineering of Handbook*, 1956.

URS Australia Pty Ltd , *Water Sensitive Urban Design - Technical Guidelines for Western Sydney*, 2004.

Oberndorfer E., Lundholm J., *Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services*, American Institute of Biological Sciences, 2007.

APPENDICE A

A.1 - SWMM 5.1

Il software utilizzato per l'analisi dei sistemi di drenaggio urbano in questo studio è l'EPA SWMM – Storm Water Management Model, sviluppato inizialmente nel 1971 dal Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory, che si occupa di mantenerlo ed aggiornarlo tutt'oggi.

Il software permette di simulare eventi meteorici, di valutare la risposta di un bacino idrografico e del relativo sistema di drenaggio urbano in termini quantitativi e qualitativi. Permette infatti di valutare il carico inquinante del deflusso urbano trasportato attraverso l'acqua dalle superfici verso la rete dei collettori.

Per la modellazione di un caso di studio in SWMM si procede creando le varie componenti del sistema di drenaggio tramite gli strumenti forniti e assegnando loro proprietà e i rispettivi valori, in modo da descrivere al meglio la situazione oggetto di analisi. Di seguito vengono esposti gli strumenti, i modelli ed i metodi di calcolo disponibili per le simulazioni, tra cui quelle utilizzate per lo svolgimento dell'analisi in questo lavoro di tesi.

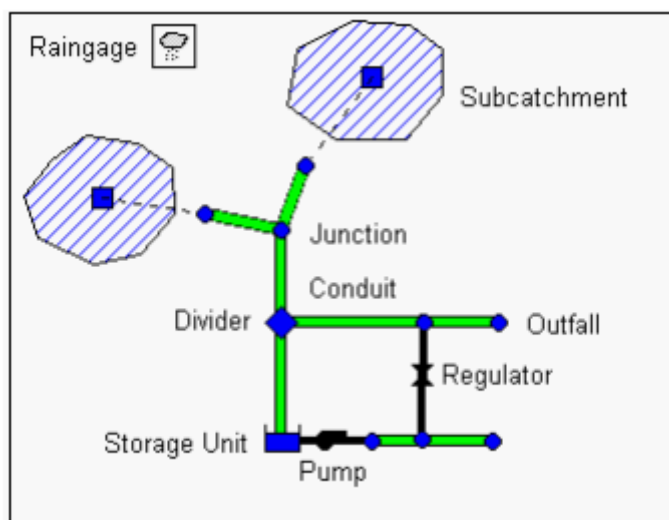
A.2 – Modello Concettuale

SWMM concettualizza un sistema di drenaggio come una serie di flussi di acqua e materiale tra vari significativi elementi ambientali. Questi sono:

- Il compartimento "Atmosfera", che genera acque meteoriche e depositi di inquinanti sul compartimento "Terreno". SWMM utilizza il Rain Gage per rappresentare le precipitazioni nel sistema.
- Il compartimento "Terreno", il quale è rappresentato da uno o più oggetti "subcatchment". Esso riceve precipitazione dal compartimento "Atmosfera" sotto forma di pioggia o neve, e permette all'acqua di infiltrarsi inviandola al compartimento "Acque sotterranee", o come deflusso al compartimento "Trasporto".
- Il compartimento "Acque sotterranee" riceve l'acqua infiltrata dal compartimento "Terreno" e ne trasferisce una parte al compartimento "Trasporto". Questo compartimento viene modellato tramite l'oggetto "Aquifer".
- Il compartimento "Trasporto" è composto da un network di elementi di movimentazione dell'acqua e di unità di stoccaggio o trattamento. Questo compartimento utilizza gli oggetti "Node" e "Link".

A.3 – Oggetti visivi

La Fig. A.1 mostra come degli oggetti visivi in SWMM possono essere combinati per rappresentare un sistema di drenaggio delle acqua meteoriche. Questi oggetti possono essere visualizzati nell'ambiente integrato del software, e ne viene fornita una descrizione:



(Fig. A.1, oggetti usati per modellare un sistema di drenaggio in SWMM)

A.3.1 - Rain Gages

I Rain Gages forniscono i dati della precipitazione per uno o più subcatchment nell'area oggetto di studio. I dati dell'evento meteorico possono essere forniti tramite serie temporali definite dall'utente o tramite file esterni, in vari formati. Le proprietà di un Rain Gage sono:

- X-Coordinate: posizione sull'asse orizzontale dell'oggetto sulla mappa;
- Y-Coordinate: posizione sull'asse verticale dell'oggetto sulla mappa;

- Description: opzionale descrizione dell'oggetto;
- Tag: parole chiave utilizzate per creare gruppi di oggetti;
- Rain format: grandezza fisica con cui i dati pluviometrici sono presentati;
- Rain Interval: intervallo di tempo tra due letture successive del pluviometro;
- Snow Catch Factor: fattore di correzione per precipitazioni nevose;
- Data Sources: serie temporali o file;
- Series Name: nome della serie temporale;
- File Name: nome del file;
- Station No.: numero della stazione di registrazione nel file;
- Rain Units: unità di misura con cui i dati pluviometrici sono presentati nel file.

A.3.2 - Subcatchments

Questi oggetti sono sottobacini idrologici la cui topografia ed il sistema di drenaggio dirigono il deflusso ad un singolo punto di scarico. La loro superficie viene divisa in area permeabile, nel quale l'acqua può infiltrarsi, ed impermeabile. Sono disponibili i modelli di infiltrazione di Horton, di Green-Ampt e Curve Number. La cattura e la ritenzione delle acque meteoriche e del deflusso possono essere modellate tramite l'utilizzo di vari tipi di LID che SWMM mette a disposizione.

I parametri di un Subcatchment sono:

- X-Coordinate: posizione sull'asse orizzontale dell'oggetto sulla mappa;
- Y-Coordinate: posizione sull'asse verticale dell'oggetto sulla mappa;
- Description: opzionale descrizione dell'oggetto;

- Tag: parole chiave utilizzate per creare gruppi di oggetti;
- Rain Gage: Rain Gage associato al subcatchment;
- Outlet: nodo che riceve il deflusso superficiale generato;
- Area: superficie del subcatchment;
- Width: larghezza caratteristica del subcatchment, utilizzato come parametro di calibrazione. Un significato fisico può essere dato tramite il rapporto tra l'area del subcatchment e la massima lunghezza di scorrimento dell'acqua per raggiungere il collettore;
- %Slope: pendenza media del subcatchment;
- %Imperv: percentuale della superficie del subcatchment impermeabile;
- N-Imperv: coefficiente di Manning per le superfici impermeabili;
- N-Perv: coefficiente di Manning per le superfici permeabili;
- Dstore-Imperv: profondità media delle depressioni superficiali nella porzione impermeabile del subcatchment;
- Dstore-Perv: profondità media delle depressioni superficiali nella porzione permeabile del subcatchment;
- %Zero-Imperv: percentuale della porzione impermeabile senza depressioni superficiali.
- Infiltration: modello di infiltrazione scelto e relativi parametri;
- LID Controls: eventuali LIDs presenti e relativi parametri per il loro inserimento nel subcatchment.

A.3.2.1 – Infiltrazione

L'infiltrazione dell'acqua nel terreno nel compartimento "Acque sotterranee" in SWMM può essere descritta attraverso quattro modelli:

- metodo di Hordon classico;
- metodo di Horton modificato;
- metodo di Green-Ampt;
- metodo SCS curve number.

Nel lavoro di tesi viene utilizzato il metodo di Horton classico. Esso è basato su osservazioni empiriche, ed afferma che per precipitazioni meteoriche sufficientemente prolungate, l'infiltrazione decresce esponenzialmente da un quantitativo iniziale massimo, fino ad un valore minimo secondo la legge (A.1):

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (A.1)$$

in cui:

f = capacità di infiltrazione al tempo t ;

f_0 = valore massimo iniziale di f ;

f_c = valore costante finale di f a suolo saturo;

k = costante dipendente dalle caratteristiche del suolo;

t = durata della pioggia

L'utilizzo di questo metodo richiede i parametri di infiltrazione minimo e massimo, la

costante k ed il tempo impiegato per un terreno del tutto saturo ad asciugarsi completamente.

A.3.2.2 – Deflusso superficiale

Il valore del deflusso in SWMM è fornito come output a seguito di una simulazione, ed è conseguenza dalle caratteristiche del Subcatchment e del Rain Gage utilizzato. I fenomeni idrologici di infiltrazione, intercettazione e accumulo nelle depressioni superficiali costituiscono delle perdite che sottratte all'afflusso meteorico totale forniscono la quota di precipitazione che contribuisce alla formazione del deflusso superficiale. In SWMM questo aspetto è concettualizzato considerando ogni superficie come un serbatoio non lineare: gli ingressi sono forniti dalla precipitazione governata dal Rain Gage, mentre le uscite sono garantite dal deflusso superficiale, dall'infiltrazione e dall'evaporazione. Il volume è rappresentato dalla massima capacità di immagazzinamento delle depressioni (per le superfici impermeabili); dal volume dei vuoti e dal grado di saturazione del terreno (per le superfici permeabili).

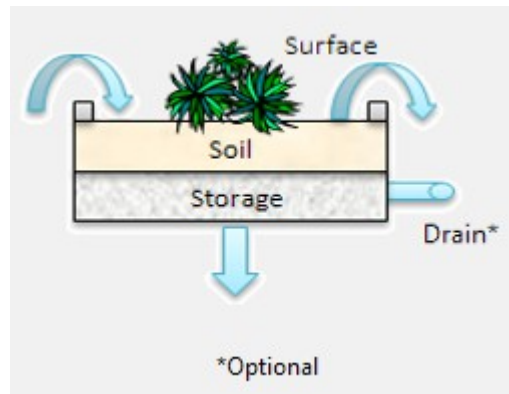
A.3.3 – LID Controls

Lo SWMM permette la modellazione di alcune tipologia di LIDs (Low Impact Development) per la raccolta e la gestione dei deflussi superficiali, tramite meccaniche di infiltrazione, laminazione ed evapotraspirazione.

Nel software sono utilizzabili sette modelli su cui costruire e personalizzare dei LID:

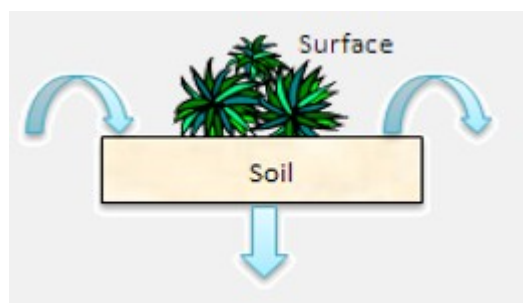
- Bio-Retention Cell (Fig. A.2a): una cella di bio-ritenzione è composta da uno

strato di suolo collocato sopra un letto drenante. Permette lo stoccaggio, l'evapotraspirazione tramite la vegetazione in superficie, e l'infiltrazione dell'acqua derivante dalla precipitazione o dai deflussi delle aree circostanti.



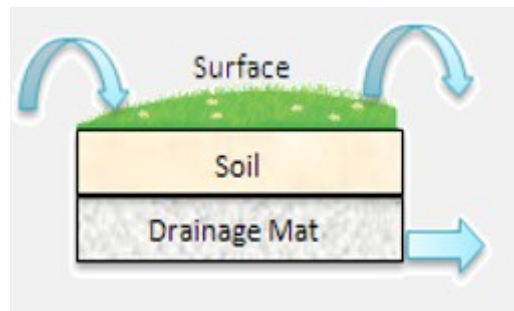
(Fig. A.2a, Schema di una Bio-Retention Cell)

- Rain Garden (Fig. A.2b): simile alla cella bioritensiva, ma sprovvista dello strato drenante.



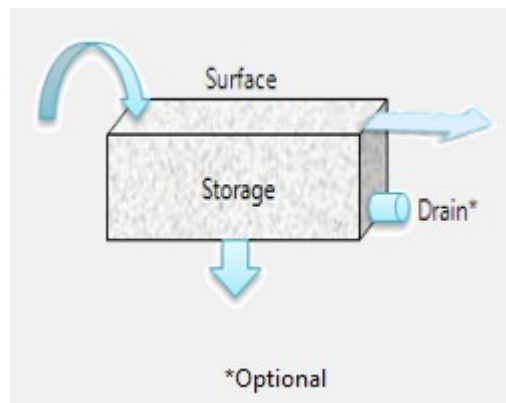
(Fig. A.2b, Schema di un Rain Garden)

- Green Roof (Fig. A.2c): anche il tetto verde è equivalente alla cella di bioritenzione, con la particolarità di avere al posto dello strato drenante un Drainage Mat, il quale è un elemento di drenaggio artificiale che raccoglie, lamina e porta via le acque in eccesso dalla copertura (senza infiltrazione).



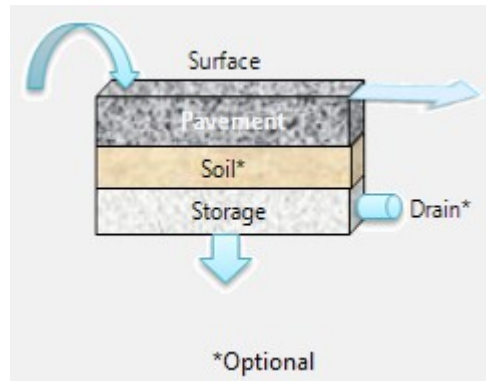
(Fig. A.2c, Schema di un Green Roof)

- Infiltration Trench (Fig. A.2d): la trincea d'infiltrazione è rappresentata da un solo strato di drenaggio, con la possibilità di infiltrare acqua nel terreno sottostante.



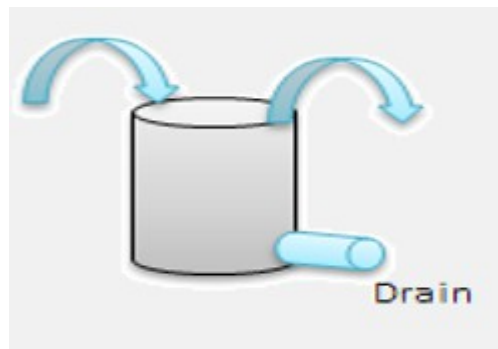
(Fig. A.2d, Schema di una Infiltration Trench)

- Permeable Pavement (Fig. A.2e): utilizzato per le pavimentazioni permeabili continue o discontinue. Nel primo caso l'acqua attraversa lo strato di asfalto poroso, fino a raggiungere lo strato di drenaggio, nell'altro la pavimentazione presenta delle aperture attraverso cui l'acqua può percolare. E' opzionale l'aggiunta di uno strato di terreno, solitamente sabbia, per filtrare l'acqua prima del raggiungimento dello strato di stoccaggio.



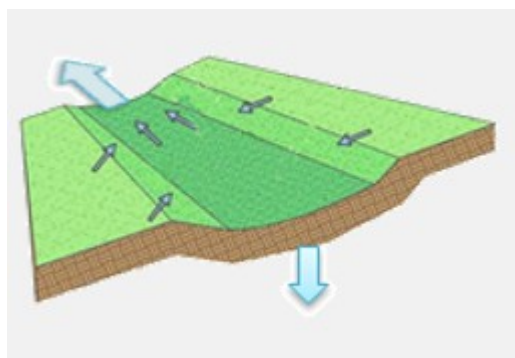
(Fig. A.2e, Schema di un Permeable pavement)

- Rain Barrel (Fig. A.2f): Cisterna per la raccolta delle acque meteoriche, permettono l'accumulo ed il rilascio nei periodi di tempo asciutto.



(Fig. A.2f, Schema di un Rain Barrel)

- Vegetative Swale (Fig. A.2g): sono canali nei quali viene indirizzata l'acqua dalle superfici circostanti per essere poi laminata ed infiltrata nel terreno.



(Fig. A.2g, Schema di una Bio-Retention Cell)

Ogni strato ed i relativi parametri viene descritto di seguito:

Surface layer:

- Berm Height: profondità massima dello strato d'acqua che può stagnare sulla superficie;
- Vegetation Volume Fraction: frazione di volume di stoccaggio occupato dalla vegetazione;
- Roughness: coefficiente di Manning per la superficie;
- Surface Slope: pendenza media della superficie;
- Swale Side Slope (solo per vegetative swale): pendenza delle pareti laterali della sezione trasversale;

Pavement layer:

- Thickness: spessore del pavimento;
- Void Ratio: rapporto tra volume dei vuoti e volume dei solidi;
- Impervious Surface Fraction: quota dei blocchi impermeabili rispetto all'intera area pavimentata per i sistemi modulari;
- Permeability: permeabilità del materiale;
- Clogging Factor: fattore di intasamento;

Soil Layer:

- Thickness: spessore del suolo;
- Porosity: rapporto tra volume dei vuoti e volume totale;
- Field Capacity: volume d'acqua nei pori rispetto al volume totale del suolo

dopo che il terreno è stato completamente drenato;

- Wilting Point: volume d'acqua nei pori rispetto al volume totale del suolo asciutto, dove rimano solo acqua vincolata;
- Conductivity: conducibilità idraulica del suolo completamente saturo;
- Conductivity Slope: pendenza della curva conducibilità-contenuto di umidità del suolo;
- Suction head: valore medio della suzione capillare lungo il fronte umido;

Storage layer:

- Thickness: spessore dello strato;
- Void Ratio: rapporto tra il volume dei vuoti e il volume solido;
- Infiltration Rate: conducibilità idraulica del terreno naturale sotto lo strato di accumulo;
- Clogging Factor: fattore di intasamento;

Drainage mat layer:

- Thickness: spessore dello strato;
- Void Ratio: rapporto tra il volume dei vuoti e il volume solido;
- Roughness: coefficiente di Manning;

Dopo aver creato i LID, essi vanno inseriti all'interno dei subcatchment, specificando le seguenti caratteristiche:

- Area of Each Unit: superficie occupata da ciascun LID;

- Number of Replicate Units: numero di LIDs con la stessa superficie;
- Surface Width per Units: larghezza di ciascun LID;
- %Initially Saturated: condizioni di saturazione iniziale del soil layer, o qualora il LID non ne avesse uno, dello storage layer;
- % Impervious Area Treated: percentuale di porzione impermeabile del sottobacino;
- Return All Outflow to pervious Area: opzione per dirigere i volumi in eccesso dalla sottorete verso le aree permeabili del subcatchment.