



Città  
metropolitana  
di Milano



# Progetto di Fattibilità Tecnico Economica

## Piano Urbano Integrato Città metropolitana Spugna

### **ALLEGATO 3 - Strumenti per la progettazione di opere di Drenaggio Urbano sostenibile**

Il Progettista:

Ing. Marco Callerio – CAP Holding spa

10 marzo 2022

## Strumenti per la progettazione di opere di Drenaggio Urbano sostenibile

In questo elaborato, si vogliono offrire alcuni approfondimenti e spunti di riflessione circa l'applicazione delle tecniche di drenaggio urbano sostenibile e, in particolar modo, quelle che prevedono l'inserimento di vegetazione.

La manualistica e la letteratura tecnica riportano un'abbondante casistica di sistemi di drenaggio urbano sostenibile e a cui si rimanda per gli approfondimenti necessari. Tra le tipologie di opere maggiormente utilizzate per la gestione distribuita del deflusso urbano si citano:

1. aree verdi filtranti: consiste nel convogliare le acque provenienti dalle superfici impermeabili in aree adatte all'infiltrazione e modellate spesso a formare avvallamenti con funzione di accumulo temporaneo dell'acqua meteorica; è la soluzione che si presta meglio di altre allo sviluppo della vegetazione e all'ottenimento di effetti scenici di pregio (si veda ad esempio i *rain garden*)
2. cunette e fossi di infiltrazione: sono avvallamenti del terreno più o meno accentuati, generalmente di estensione lineare, in grado di accumulare e disperdere nel sottosuolo le acque meteoriche;
3. trincee drenanti: sono costituiti da scavi riempiti da materiale poroso in grado di immagazzinare l'acqua prima che questa venga smaltita attraverso il processo di infiltrazione; la parte sommitale può essere coperta da materiale inerte o da vegetazione.
4. pozzi di infiltrazione: sono elementi di forma cilindrica, costituiti da elementi prefabbricati ad anello, che sfruttano la presenza di vuoti per accumulare l'acqua e la superficie permeabile per disperdere la stessa nel suolo.

### 1 Fattori da considerare nella progettazione delle opere di infiltrazione

#### Qualità delle acque

Il primo fattore da considerare nella progettazione delle opere di infiltrazione è la qualità delle acque che si intende trattare. A seconda che questa sia di buona qualità ovvero senza carichi inquinanti significativi ovvero di qualità tollerabile, ovvero che richiede alcuni accorgimenti, o intollerabile, cioè che necessita di un trattamento depurativo spinto, si potrà scegliere se e quale sistema di infiltrazione utilizzare. I fattori che determinano la qualità delle acque piovane sono il grado di inquinamento dell'aria e la presenza di inquinanti, per deposito o asportazione, presenti sulle superfici di scorrimento. L'acqua meteorica ha di per sé una certa concentrazione di inquinanti (cloruri, solfati nitrati, potassio, ammonio, calcio, magnesio, metalli pesanti e composti organici) che possono raggiungere concentrazioni significative in ambienti fortemente inquinati. Le stesse superfici di scorrimento possono liberare elementi inquinanti (ad es. metalli pesanti) ovvero favorire la dispersione di oli e altri composti aromatici provenienti dal traffico veicolare. Conseguentemente, la scelta se è possibile preferire un sistema disperdente oppure trattare le acque nel sistema fognario dovrà tenere conto del contesto generatore in cui i deflussi si generano. Le soluzioni che prevedono uno strato vegetato alla sommità (aree verdi filtranti, fossi di infiltrazioni e trincee drenanti) offrono la possibilità di poter trattare fino all'88% del carico inquinante (Purvis et al. 2018).

#### Tipo di suolo

Il secondo fattore da considerare è la presenza di strati di suolo con scarse capacità di infiltrazione. Il parametro da considerare è la conducibilità idraulica che ha l'unità di misura di una velocità. Indicativamente,

un suolo adatto a opere di infiltrazione dovrebbe avere una conducibilità idraulica compresa tra  $10^{-3}$  e  $10^{-6}$  m/s (Figura 1). Valori più alti hanno un effetto positivo sulla capacità disperdente delle opere di infiltrazione ma non garantiscono i tempi necessari affinché il suolo stesso espleti la funzione di filtro, compromettendo la qualità delle acque sotterranee. Valori di conducibilità più bassi, viceversa, non consentono lo svuotamento dell'opera di infiltrazione in tempi compatibili con le necessità tecniche (ad es. 48 ore) e favoriscono fenomeni di stagnazione in superficie. Indicativamente, i suoli sabbiosi e sabbio limosi sono i più adatti allo scopo. Occorre tuttavia verificare se, lungo il profilo pedologico non esistano strati con caratteristiche di impermeabilità maggiori, tali da compromettere la funzionalità dell'opera,

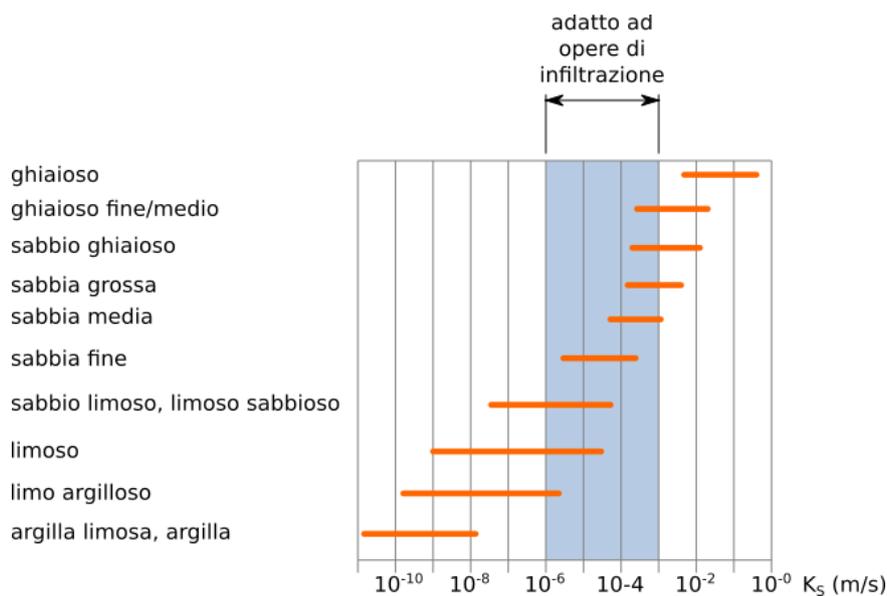


FIGURA 1: CONDUCEBILITÀ IDRAULICA PER DIVERSE CLASSI TESSITURALI (MODIFICATO DA DWA 2005)

## Profondità della falda

Quanto maggiore è la profondità della falda, migliore sarà la capacità di accumulo dell'opera di infiltrazione, la velocità di svuotamento e la rimozione di inquinanti. Come minimo, la falda si deve trovare ad una profondità di almeno 1 m dalla base dell'opera di infiltrazione (DWA 2005). Per profondità minori, infatti, sono maggiori i flussi capillari che vanno a ridurre il volume dei vuoti e il tasso di infiltrazione.

## Stabilità dell'area

Nel posizionamento dell'opera di infiltrazione si dovrà prestare attenzione alla conformazione del terreno. Su terreni acclivi, la formazione anche temporanea di strati di suolo saturo favorisce l'innescarsi di fenomeni franosi. Occorrerà inoltre valutare la presenza di fenomeni geologici particolari come conformazioni carsiche o erosioni sotterranee (occhi pollini).

## Aree precluse all'infiltrazione

Occorrerà inoltre verificare se l'area in cui si intende installare l'opera di infiltrazione non sia interdotta allo scavo per la presenza di sottoservizi ovvero terreni contaminanti. Sono impossibilitate alla realizzazione delle opere di infiltrazione le fasce di rispetto dei pozzi ad uso potabile.

## Interazione con gli edifici e altri manufatti

Le opere di infiltrazione dovranno avere interazione minima con gli altri manufatti presenti nell'area oggetto di intervento. Salvo eccezioni in cui le fondamenta dell'edificio ovvero i piani interrati siano completamente

a tenuta perché inseriti in un contesto di falda relativamente superficiale, come regola generale, il DWA (2005) suggerisce di adottare una distanza superiore a 1,5 volte la profondità massima delle fondamenta. Nel caso di grossi bacini di ritenzione, la distanza minima deve essere la metà della larghezza media di invaso.

## 2 Metodi per il dimensionamento delle opere di infiltrazione

I criteri di dimensionamento proposti nel seguito, si applicano in generale a bacini di drenaggio (l'insieme delle aree collettate) non superiori a 200 ha e con tempi di traslocazione lungo la rete di drenaggio (corrivazione) inferiori a 15 min.

In tali condizioni è possibile trascurare l'effetto di ritardo nella generazione dell'onda di piena e di laminazione lungo la rete, per cui la portata d'acqua in ingresso all'opera di infiltrazione,  $Q_p$  (m<sup>3</sup>/s), è direttamente collegata all'intensità di pioggia,  $i_{P(D,T)}$  (mm/s) e alla superficie impermeabile del bacino drenato,  $A_{imp}$  (m<sup>2</sup>), secondo la relazione:

$$\text{eq. 1} \quad Q_p = 10^{-3} i_{P(D,T)} A_{imp}$$

La superficie impermeabile si ottiene come somma pesata dei contributi delle singole classi di uso del suolo ovvero:

$$\text{eq. 2} \quad A_{imp} = \sum(A_i \varphi_i)$$

Dove  $A$  (m<sup>2</sup>) e  $\varphi$  (-) sono rispettivamente la superficie e il coefficiente di deflusso di ogni classe di uso del suolo. La normativa vigente suggerisce come valori di coefficiente di deflusso 1 nel caso di superfici impermeabili (tetti tradizionali, asfalti), 0,7 nel caso di superfici semipermeabili (pavimentazioni permeabili e tetti verdi) e 0.3 nel caso di quelle permeabili (ad es. le aree verdi su suolo).

L'intensità della pioggia di progetto,  $i_{P(D,T)}$ , varia in funzione della durata  $D$  (min) e del tempo di ritorno,  $T$  (anni) e può essere calcolata applicando le formule delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, LSPP.

Le LSPP sono espresse dalla seguente relazione:

$$\text{eq. 3} \quad i_{P(D,T)} = a_T \left(\frac{D}{60}\right)^{n_T-1}$$

dove  $a_T$  e  $n_T$  sono parametri sito specifici, che derivano dall'elaborazione statistica delle serie storiche delle precipitazioni per ciascun tempo di ritorno.

In Lombardia, è possibile utilizzare i dati del progetto STRADA, secondo cui il parametro  $a_T$  è definito applicando la seguente relazione:

$$\text{eq. 4} \quad a_T = w_T a_1$$

$$\text{eq. 5} \quad w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\}$$

Dove i parametri  $a_1$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha$ ,  $k$  e  $n_T$  sono interrogabili dalla piattaforma del progetto STRADA (ARPA Lombardia 2011).

Poiché i parametri hanno valore per durata della precipitazione superiore all'ora, è necessario applicare un opportuno coefficiente di riduzione,  $r$ , per non sovrastimare le precipitazioni associate alle piogge di durata inferiore ai 60 minuti secondo la relazione:

eq. 6 
$$\frac{h_D}{h_{D=60}} = 0.54 D^{0.25} - 0.50$$

Dove  $h_D$  è la precipitazione (mm) per assegnata durata D.

Per il calcolo della portata infiltrata occorre determinare il tasso di infiltrazione,  $v_i$  (m/s), attraverso la formula di Darcy:

eq. 7 
$$v_i = k_i I_{hy}$$

Dove  $k_i$  è la conducibilità idraulica del suolo (m/s) e  $I_{hy}$  è il gradiente idraulico (m/m).

La conducibilità idraulica di un suolo non saturo è circa la metà di quella di un suolo saturo per cui:

eq. 8 
$$v_{i,uns} = \frac{k_s}{2} I_{hy}$$

Dove  $k_s$  (m/s) è la conducibilità di un suolo in condizioni di saturazione.

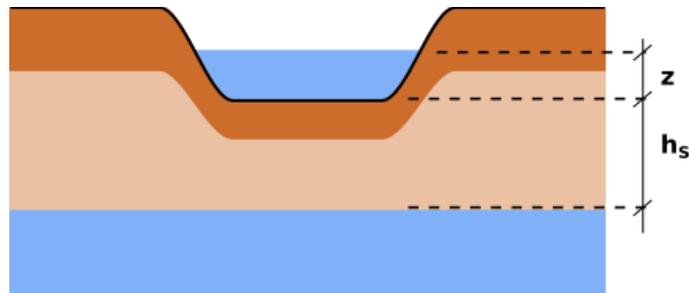


FIGURA 2: ALTEZZE DI RIFERIMENTO PER IL CALCOLO DEL GRADIENTE IDRAULICO.

Con riferimento alla Figura 2, il gradiente idraulico è calcolato come:

eq. 9 
$$I_{hy} = \frac{h_s+z}{h_s+z/2} \sim 1 \text{ se } z \ll h$$

Dove  $h_s$  (m) è la distanza della falda dal fondo dell'opera di infiltrazione,  $z$  (m) è lo spessore dello strato saturo. Quest'ultimo termine, se piccolo rispetto alla profondità della falda consente di considerare  $I_{hy}$  pari a 1.

La portata infiltrata,  $Q_i$  (m<sup>3</sup>/s), sarà quindi data dall'equazione:

eq. 10 
$$Q_i = v_{i,uns} A_i = \frac{k_s}{2} A_i$$

Dove  $A_i$  è l'area (m<sup>2</sup>) attraverso cui avviene il processo di infiltrazione.

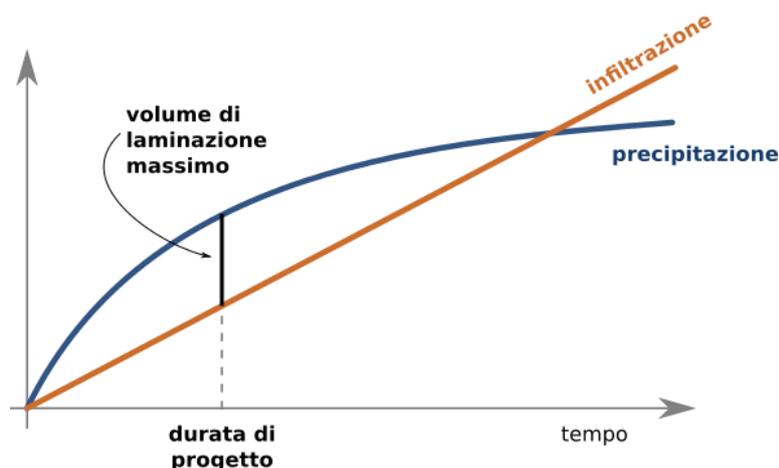


FIGURA 3: RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEL PROCESSO DI DETERMINAZIONE DELLA DURATA DELL'EVENTO DI PIOGGIA A CUI CORRISPONDE IL MASSIMO VOLUME DI LAMINAZIONE.

Il terzo parametro idraulico da stimare è il volume di laminazione,  $V$  ( $m^3$ ) dell'opera di infiltrazione che è calcolato applicando il principio di continuità ovvero dalla relazione:

$$\text{eq. 11} \quad V = (Q_p - Q_i) D \cdot 60$$

Dove  $D$  (min) è la durata dell'evento piovoso. La durata  $D$  è una incognita di progetto e, poiché si vuole ottenere il volume massimo di laminazione necessario al funzionamento dell'opera, si applica l'equazione di continuità per durate  $D$  crescenti fino all'ottenimento del valore massimo di volume, in analogia con il metodo delle "sole piogge" (Figura 3).

## 2.1 Aree verdi filtranti

Per il dimensionamento delle aree verdi filtranti si procede con la definizione della superficie da destinare all'opera di infiltrazione, note le caratteristiche di permeabilità del suolo,  $k_s$ , e la superficie impermeabile drenata,  $A_{imp}$ .

Combinando l'eq. 11 con l'eq. 10 e l'eq. 1 si ottiene:

$$\text{eq. 12} \quad V = \left( 10^{-3} i_{P(D,T)} A_{imp} - \frac{k_s}{2} A_i \right) D \cdot 60 \cdot FS$$

Si noti che, in questo caso la superficie dell'opera di drenaggio non è trascurabile poiché, da diversi test con tipologie di suoli differenti, è di circa il 10 – 20 % della superficie drenata. Per cui, l'area drenata impermeabile dovrà tenere conto anche della superficie dell'area di infiltrazione che, cautelativamente, ha  $\varphi$  pari a 0.7. Si noti inoltre che il volume di invaso  $V$  è a sua volta in funzione della superficie dell'area drenata.

Per tenere conto delle semplificazioni nel dimensionamento dell'opera di invaso, si suggerisce di considerare un fattore di sicurezza con valori tra 1.1 e 1.2.

L'eq. 12 può essere risolta per tentativi, ipotizzando una superficie dell'opera di infiltrazione e verificando che l'altezza d'acqua di invaso sia inferiore ai 30 cm e che il volume sia svuotato nel tempo di 48 ore. Se una o entrambe le condizioni non sono verificate, occorrerà ripetere l'operazione ipotizzando una superficie maggiore.

Esempio

Le acque raccolte da un tetto di superficie 2000 m<sup>2</sup> vengono convogliate in una zona verde limitrofa di superficie 500 m<sup>2</sup> e si intende smaltirle per infiltrazione. Il suolo indisturbato è sabbioso con conducibilità idraulica,  $k_s = 10^{-4}$  m/s ma l'area verde è ricoperta da uno strato di terra di coltivo debolmente argillosa con  $k_s = 5 * 10^{-5}$  m/s. I parametri della LSPP per  $T = 50$  anni sono:  $a_{50} = 62.63$ ,  $n_{50} = 0.318$ .

Ipotizzando una superficie disperdente di primo tentativo di 200 m<sup>2</sup>, la superficie impermeabile totale è 2134 m<sup>2</sup>. Si risolve quindi l'eq. 12 per durate di pioggia crescenti e fattore di sicurezza 1.2. La Tabella 1 mostra che il volume massimo di laminazione è pari a 163 m<sup>3</sup> e si realizza al minuto 211.

Dividendo il volume di laminazione per la portata di infiltrazione si ottiene un tempo di svuotamento di circa 9 ore che è minore del tempo richiesto dalla normativa. Tuttavia la massima profondità di invaso sarà circa 82, ben al di sopra del limite consigliato di 30 cm per le aree potenzialmente fruibili. E' quindi necessario ripetere i calcoli ipotizzando una superficie disperdente maggiore pari a 430 m<sup>2</sup>.

TABELLA 1: DIMENSIONAMENTO DI UN'AREA VERDE DI INFILTRAZIONE.

D (min)	r (-)	h <sub>D</sub> (mm)	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V (m <sup>3</sup> )
0	0.00	0.00	0.00	0.01	0
1	0.04	2.51	0.09	0.01	6
2	0.14	8.90	0.16	0.01	22
3	0.21	13.20	0.16	0.01	33
4	0.26	16.51	0.15	0.01	41
...	...	...	...	...	...
<b>211</b>	<b>1.56</b>	<b>93.43</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>163</b>
...	...	...	...	...	...

## 2.2 Cunette e fossi di infiltrazione

Le cunette o i fossi di infiltrazione sono avvallamenti in cui vengono raccolte le precipitazioni provenienti dalle superfici impermeabili limitrofe, generalmente con estensione lineare (strade, parcheggi, ecc.). Gli avvallamenti sono tipicamente coperti da uno strato di terra di coltivo di spessore 10 – 30 cm su suolo sufficientemente drenante per assicurare l'infiltrazione. L'avvallamento consente di immagazzinare temporaneamente il volume di pioggia in attesa che il processo di infiltrazione abbia termine.

E' sempre opportuno dotare il fosso di una opportuna copertura vegetale per favorire i processi depurativi, importanti in contesti urbanizzati, e la funzionalità ecosistemica.

Il fondo del fosso deve avere pendenza minima per ridurre al minimo i fenomeni di ruscellamento. In caso di acclività, è opportuno suddividere i fossi mediante terrapieni drenanti (Figura 5).

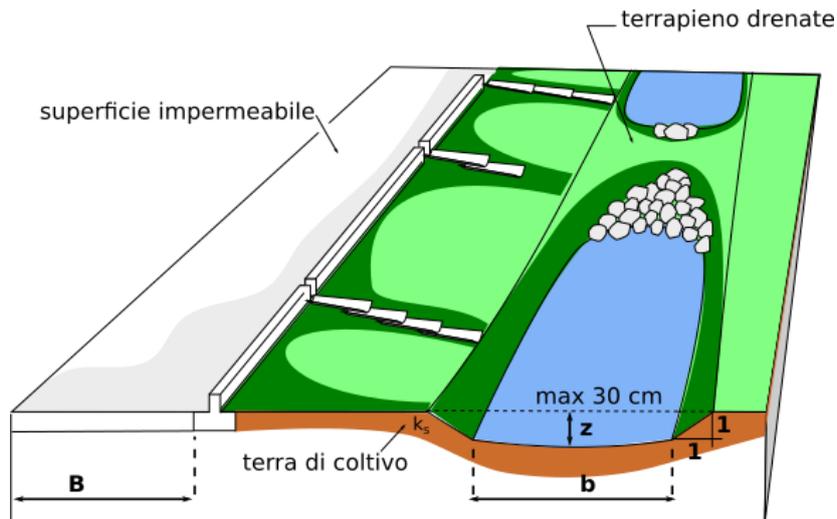


FIGURA 4: SCHEMA TIPO DI UN FOSCO DI INFILTRAZIONE.

Dal punto di vista dimensionale, la procedura è analoga a quanto mostrato con il caso delle aree verdi filtranti (cfr. par.2.1) ma, in questo caso può essere opportuno calcolare la larghezza della cunetta o del fosso, nota la lunghezza dell'elemento lineare, il livello massimo di sommersione atteso e la scarpa della sezione della cunetta.

Infine, dovrà essere sempre verificato il tempo massimo di infiltrazione pari a 48 ore.

### Esempio

Si vuole calcolare la larghezza di un fosso di infiltrazione che è a servizio di un tratto di strada di 3 m (considerando una sola carreggiata). I parametri della LSPP e le caratteristiche dei suoli sono gli stessi dell'esercizio precedente. Il fosso ha sezione trapezoidale con scarpa 1:1 (45°) e si accetta un riempimento massimo di 30 cm.

Si ipotizza una sezione trapezoidale con base minore pari a 50 cm da cui si ricava la superficie infiltrante pari a:

$$A_i = (0.5 + 2 * 0.3) * 1$$

considerando una lunghezza unitaria dell'elemento. Allo stesso modo, si calcola della superficie della strada che sarà 3 m<sup>2</sup> per unità di lunghezza dell'elemento da cui si ottiene la superficie impermeabile totale pari a

$$A_{imp} = 3 * 1 + (0.5 + 2 * 0.3) * 0.7$$

Con tali informazioni si risolve l'eq. 12 con FS = 1 e per durate crescenti (Tabella 2). Il volume di laminazione è quindi pari a 0.332 m<sup>3</sup> per unità di lunghezza della strada, il che comporta un livello di riempimento della cunetta di circa 30 cm, come da ipotesi iniziali e quindi accettabile. Il tempo di svuotamento è di 7 ore, minore del requisito normativo di 48 ore.

TABELLA 2: DIMENSIONAMENTO DI UNA CUNETTA FILTRANTE.

D (min)	r (-)	h <sub>D</sub> (mm)	Q <sub>p</sub> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)	V (m <sup>3</sup> )
0	0.00	0.00	0.000	0.028	0.00
1	0.04	2.51	0.282	0.028	0.015
2	0.14	8.90	0.501	0.028	0.057
3	0.21	13.20	0.494	0.028	0.084

4	0.26	16.51	0.464	0.028	0.105
...	...	...	...	...	...
<b>94</b>	<b>1.18</b>	<b>72.24</b>	<b>0.086</b>	<b>0.028</b>	<b>0.332</b>
...	...	...	...	...	...

### 2.3 Trincee drenanti

Le trincee drenanti sono sistemi di infiltrazione costituiti da un volume di scavo riempito di materiale poroso (Figura 5). I vuoti presenti nel materiale di riempimento consentono di immagazzinare temporaneamente il volume di pioggia in attesa che il processo di infiltrazione abbia termine.

E' sempre opportuno inserire, prima dello scarico nel volume drenante, un pozzetto di sedimentazione per ridurre l'afflusso di materiale fine e la conseguente occlusione dei pori.

Nel caso di materiale di riempimento sciolto, è opportuno inserire una o più condotte forate per meglio distribuire la portata in ingresso alla trincea e aumentare il volume dei vuoti.

E' inoltre consigliato prevedere dei pozzetti di ispezione per monitorare lo stato di funzionamento del sistema drenante.

Per il dimensionamento della trincea drenante occorre conoscere, oltre alle caratteristiche di permeabilità del suolo, anche la porosità del materiale di riempimento e il numero e il diametro delle condotte presenti. La Tabella 3 riporta i valori di porosità per alcuni materiali di riferimento.

TABELLA 3: POROSITÀ PER ALCUNI MATERIALI DI RIEMPIMENTO COMUNEMENTE IMPIEGATI NELLE OPERE DI INFILTRAZIONE.

Tipo di materiale	Porosità (-)
Elementi prefabbricati	0,9
Pietrame	0,2
Ghiaia	0,3

Il metodo proposto non considera l'eventuale scarico della portata in eccesso in altro recapito ovvero è possibile tenerne conto riducendo opportunamente la portata in ingresso.

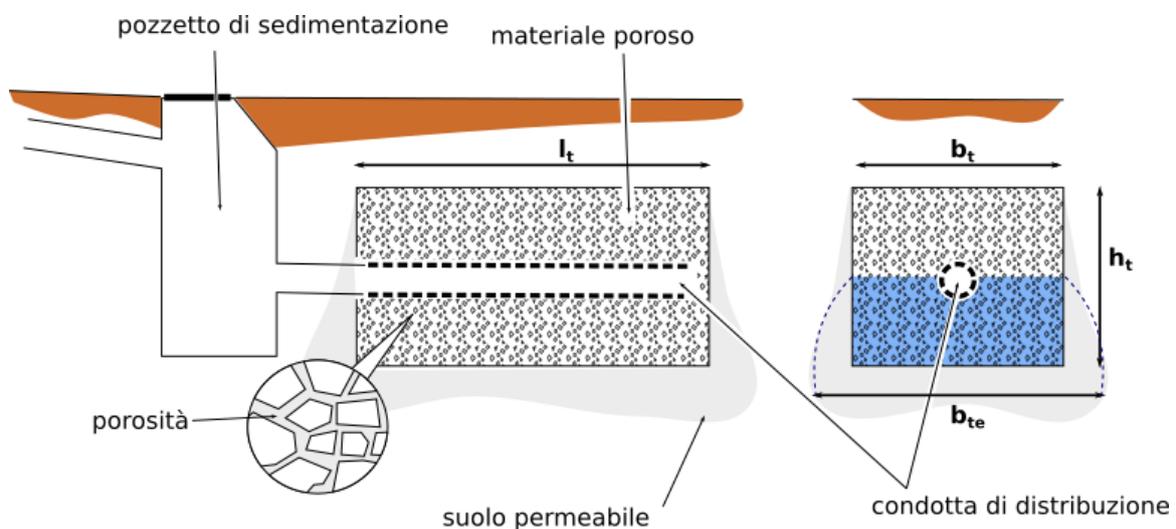


FIGURA 5: SCHEMA TIPO DI UNA TRINCEA DRENANTE

Il metodo di calcolo prevede la stima della lunghezza della trincea drenante,  $l_t$  (m) che si suppone avere sezione rettangolare di larghezza  $b_t$  (m) e altezza  $h_t$  (m).

Con riferimento alla Figura 5, la superficie percolante per unità di lunghezza della trincea sarà calcolata tenendo conto anche del contributo delle pareti secondo la relazione:

$$\text{eq. 13} \quad A_i = b_t l_t = \left(b_t + \frac{2h_t}{4}\right) l_t = \left(b_t + \frac{h_t}{2}\right) l_t$$

Nel caso siano presenti una o più condotte di raggio  $R$  (m), occorrerà modificare la porosità totale della trincea per tenere conto dei vuoti aggiuntivi, per cui la porosità ricalcolata,  $p_e$  diventa:

$$\text{eq. 14} \quad p_e = p + \frac{n\pi R^2}{b_t h_t}$$

Come primo tentativo, non si considera la superficie dell'opera stessa nel calcolo della superficie impermeabile drenata, per cui l'eq. 12, esplicitando per la lunghezza della trincea e dopo una serie di passaggi, diventa:

$$\text{eq. 15} \quad l_t = \frac{10^{-3} i_{P(D,T)} A_{imp}}{\frac{b_t h_t p_e + k_s}{D_{60FS} + \frac{1}{2}} \left(b_t + \frac{h_t}{2}\right)}$$

Con un opportuno valore di FS ovvero arrotondando per eccesso in base alla dimensione minima del manufatto (nel caso ad esempio di elementi prefabbricati modulari), si verifica che la dimensione sia compatibile con le esigenze idrauliche (secondo tentativo).

### Esempio

Le acque raccolte da un tetto di superficie  $2000 \text{ m}^2$  vengono smaltite per infiltrazione in una trincea drenante di larghezza  $1 \text{ m}$  e profondità  $0.5 \text{ m}$ . Il materiale di riempimento della trincea è ghiaia e la distribuzione dell'acqua all'interno della trincea è assicurata da due condotte forate parallele di diametro  $20 \text{ cm}$ . Il suolo è sabbioso con conducibilità idraulica,  $k_s = 10^{-4} \text{ m/s}$  e i parametri della LSPP per  $T = 50$  anni sono:  $a_{50} = 62.63$ ,  $n_{50} = 0.318$ .

Poiché il materiale di riempimento è ghiaia, si assegna una porosità,  $p$ , di  $0.30$  (Tabella 3). Vista la presenza di due condotte di raggio,  $R = 0.1 \text{ m}$ , si calcola la porosità effettiva  $p_e = 0.43$ . A questo punto si procede per durate di pioggia crescenti applicando l'eq. 15, imponendo  $b_t = 1$  e  $h_t = 0.5$ . Il risultato del processo è riportato in Tabella 4 e si ottiene una lunghezza della trincea massima pari a  $330 \text{ m}$  per una durata critica  $D$  di  $34$  minuti.

TABELLA 4: DIMENSIONAMENTO DI PRIMO TENTATIVO DI UNA TRINCEA.

D (min)	r (-)	hD (mm)	Qp (m3/s)	lt (m)
0	0.00	0.00	0.00	0
1	0.04	2.51	0.08	28
2	0.14	8.90	0.15	96
3	0.21	13.20	0.15	140
4	0.26	16.51	0.14	172
...	...	...	...	...
<b>34</b>	<b>0.80</b>	<b>50.35</b>	<b>0.05</b>	<b>330</b>
...	...	...	...	...

Si procede quindi alla verifica della lunghezza della trincea (Tabella 5), risolvendo l'eq. 12 con  $FS = 1$  e considerando la superficie drenante nel calcolo di quella impermeabile assegnando un valore di  $\varphi = 0.7$ . Il volume massimo di laminazione risultante dall'eq. 12 dovrà essere pari o inferiore al volume dei vuoti nella trincea.

TABELLA 5: VERIFICA DEI VOLUMI DI INVASO DI UNA TRINCEA DI DIMENSIONI 1 x 0.5 x 330 M.

D (min)	r (-)	h <sub>D</sub> (mm)	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V (m <sup>3</sup> )
0	0.00	0.00	0.00	0.02	0
1	0.04	2.51	0.10	0.02	5
2	0.14	8.90	0.17	0.02	18
3	0.21	13.20	0.17	0.02	27
4	0.26	16.51	0.16	0.02	33
...	...	...	...	...	...
39	0.85	53.20	0.05	0.02	74
...	...	...	...	...	...

Il volume di laminazione necessario è di poco superiore a quello della trincea di progetto, per cui è necessario aumentare la lunghezza della trincea a 342 m. Il tempo di svuotamento è inferiore all'ora e quindi soddisfa i requisiti normativi (< 48 ore).

## 2.4 Pozzi di infiltrazione

I pozzi di infiltrazione sono sistemi di infiltrazione costituiti da elementi strutturali solitamente cilindrici, vuoti e con pareti cieche o fenestrate, inseriti in un materiale drenante e poroso (Figura 5). Il volume interno del pozzo unitamente ai vuoti presenti nel materiale di riempimento, consentono di immagazzinare temporaneamente il volume di pioggia in attesa che il processo di infiltrazione abbia termine.

Con riferimento agli schemi di Figura 6, si possono distinguere due tipologie di pozzi di infiltrazione: a) a pareti cieche ovvero continue e b) a pareti fenestrate. La prima tipologia permette di concentrare il flusso alla base del pozzo per raggiungere strati di suolo permeabile e non intaccare le fondazioni vicine. La seconda tipologia consente di sfruttare una maggior superficie drenante offerta dalle pareti del pozzo che presentano delle opportune fessurazioni.

Indipendentemente dalla tipologia di pozzo scelta, è sempre opportuno inserire, a monte dello scarico nel pozzo, un sistema di raccolta del materiale fine trasportato dall'acqua raccolta ed evitare in questo modo l'occlusione degli strati drenanti, oltre a facilitare le manutenzioni.

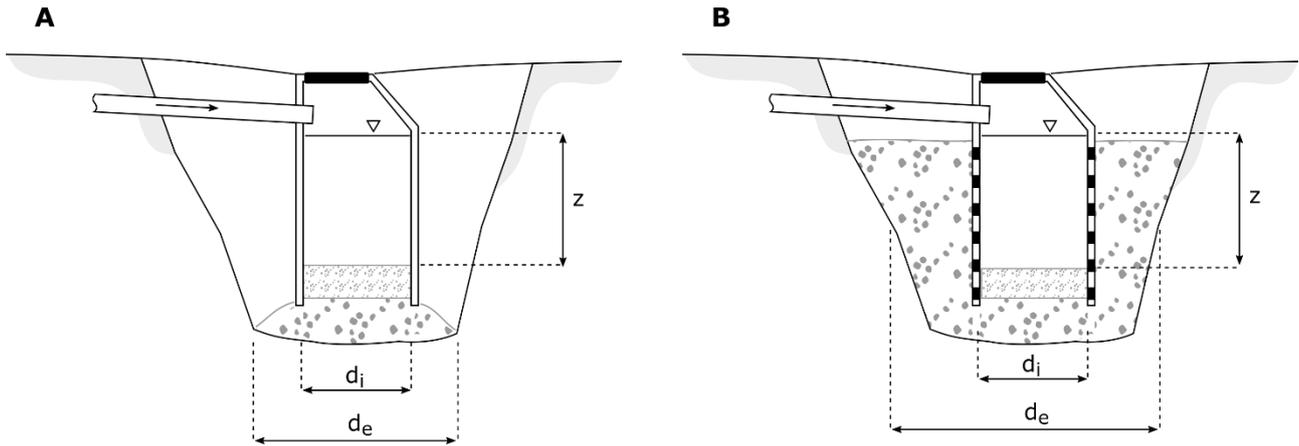


FIGURA 6: SCHEMA TIPO DI UNA TRINCEA DRENANTE

Il metodo di calcolo si basa sul bilancio di cui l'eq. 11.

La superficie di infiltrazione,  $A_i$ , dipende dalla struttura del pozzo (tipo A e tipo B) ed in particolare dalla conformazione dello strato drenante attorno all'elemento strutturale.

$$\text{eq. 16} \quad A_i = n_p * \pi * \left(\frac{d_e}{2}\right)^2 \quad \text{pozzo drenante tipo A}$$

$$\text{eq. 17} \quad A_i = n_p * \pi * \left(\left(\frac{d_e}{2}\right)^2 + d_e \frac{z}{2}\right) \quad \text{pozzo drenante tipo B}$$

Dove  $d_e$  (m) è il diametro esterno dello strato drenante e  $z$  è la profondità del pozzo e  $n_p$  è il numero dei pozzi.

Infine, il volume di invaso è dovuto sia al volume interno del pozzo e ai volumi dei vuoti del materasso drenante. Trascurando cautelativamente i vuoti del drenaggio alla base del pozzo per lo spesso minimo dello strato, il volume è calcolato come:

$$\text{eq. 18} \quad V = z * \pi * \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \quad \text{pozzo drenante tipo A}$$

$$\text{eq. 19} \quad V = z * \pi * \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 + \rho z \pi \left(\left(\frac{d_e}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_i}{2}\right)^2\right) \quad \text{pozzo drenante tipo B}$$

Risolvendo congiuntamente l'eq. 11 con le equazioni precedentemente descritte per durate di pioggia crescenti, è possibile calcolare le profondità dei pozzi corrispondenti e isolare la profondità massima che soddisfa la condizione di massimo volume di laminazione attraverso la relazione.

$$\text{eq. 20} \quad z = \frac{\left(Q_p - \frac{n \pi d_e^2 k_S}{8}\right) D_{60FS}}{\frac{\pi d_i^2}{4}} \quad \text{pozzo drenante tipo A}$$

$$\text{eq. 21} \quad z = \frac{\left(Q_p - \frac{n \pi d_e^2 k_S}{8}\right) D_{60FS}}{\frac{n \pi}{4} (d_i^2 + d_e k_S D_{60FS})} \quad \text{pozzo drenante tipo B}$$

### Esempio

Le acque raccolte da un tratto di strada di superficie  $600 \text{ m}^2$  vengono raccolte da una batteria di pozzi perdenti per un totale di 30 elementi (uno ogni 20 m di strada). Si vuole calcolare la profondità dei pozzi sia nell'ipotesi



### 3 Il ruolo della vegetazione nelle opere di infiltrazione

In questo paragrafo vengono date alcune indicazioni per la scelta delle specie vegetali da inserire nei progetti delle opere di infiltrazione e ritenzione. Si farà particolare riferimento alla tipologia delle cunette e dei fossi di infiltrazione ma le medesime considerazioni possono essere estese anche alle aree verdi filtranti e ai bacini di infiltrazione e ritenzione che possono essere visti come particolari casi della prima categoria ma da questa si differenziano per le dimensioni maggiori e valori di lunghezza e la larghezza simili.

#### 3.1 Principi generali

I fossi di infiltrazione/ritenzione con vegetazione (bioswale, noue d'infiltration/de rétention) sono elementi costruttivi finalizzati alla dispersione in suolo delle acque meteoriche provenienti da aree impermeabili poste nelle immediate vicinanze.

Tipicamente, i fossi di infiltrazione/ritenzione si realizzano mediante scavi del terreno con sezione rettangolare o trapezoidale, ad una profondità fino ad intercettare un orizzonte pedologico dotato di un certo grado di permeabilità ( $k_s$  compreso tra  $10^{-3}$  e  $10^{-6}$  m/s DWA 2005), sufficientemente lontano dalla falda sottostante (distanza maggiore di 3 m) e sufficientemente adatto alla dispersione delle acque di dilavamento.

La trincea è quindi riempita da uno strato di materiale inerte e nella parte sommitale si stende una quantità di substrato di coltivo finalizzato ad accogliere le piante di copertura.

La creazione di una superficie vegetale apporta diversi benefici direttamente collegati al funzionamento dell'impianto di dispersione e all'inserimento dell'opera.

In particolare, la vegetazione, attraverso l'apporto di sostanza organica direttamente (essudati radicati) e indirettamente (morte dei tessuti vegetali di radici, foglio, rami) contribuisce a migliorare la struttura dei suoli mediante la formazione di aggregati che aumentano la capacità di drenaggio dei suoli. La crescita stessa degli apparati radicali e la loro morte in un naturale processo di turnover, porta la formazione di macropori che hanno anch'essi un ruolo significativo nei processi di infiltrazione. La presenza poi di vegetazione fornisce habitat a specie animali ipogee che producono gallerie e cunicoli che favoriscono ulteriormente le macroporosità del suolo (Beven & Germann 1982). Mediamente, i suoli con vegetazione raggiungono capacità di infiltrazione da 10 a 100 volte più alte rispetto al medesimo suolo ma con vegetazione poco sviluppata (Chandler & Chappell 2008). E' noto poi come la crescita delle piante favorisca all'aumentare la conducibilità idraulica dei terreni vegetati (Vergani & Graf 2016).

La presenza di vegetazione protegge l'opera dai processi di erosione in superficie soprattutto laddove l'acqua, proveniente dalle aree impermeabili, si concentra per poi disperdersi nella superficie disperdente. La copertura vegetale inoltre, protegge il suolo sottostante dalla pioggia battente riducendo l'effetto di disgregazione del suolo e la sua compattazione.

La presenza delle piante, inoltre, migliora le caratteristiche delle acque infiltranti riducendo il carico di macronutrienti e metalli pesanti.

Si citano infine, per completezza, l'effetto "termico", dovuto all'ombreggiamento delle superfici e all'evaporazione dell'acqua a seguito della traspirazione dai tessuti vegetali, l'immagazzinamento di  $CO_2$  (cfr. par. 4.5) nonché l'inserimento paesaggistico, la valenza decorativa e la creazione di habitat (rifugio e/o sola alimentazione) per varie specie animali.

### 3.2 Tipologie di fossi d'infiltrazione/di ritenzione con vegetazione

I fossi d'infiltrazione si distinguono per dimensioni, tipologie di substrati impiegati e modalità di distribuzione e smaltimento delle acque.

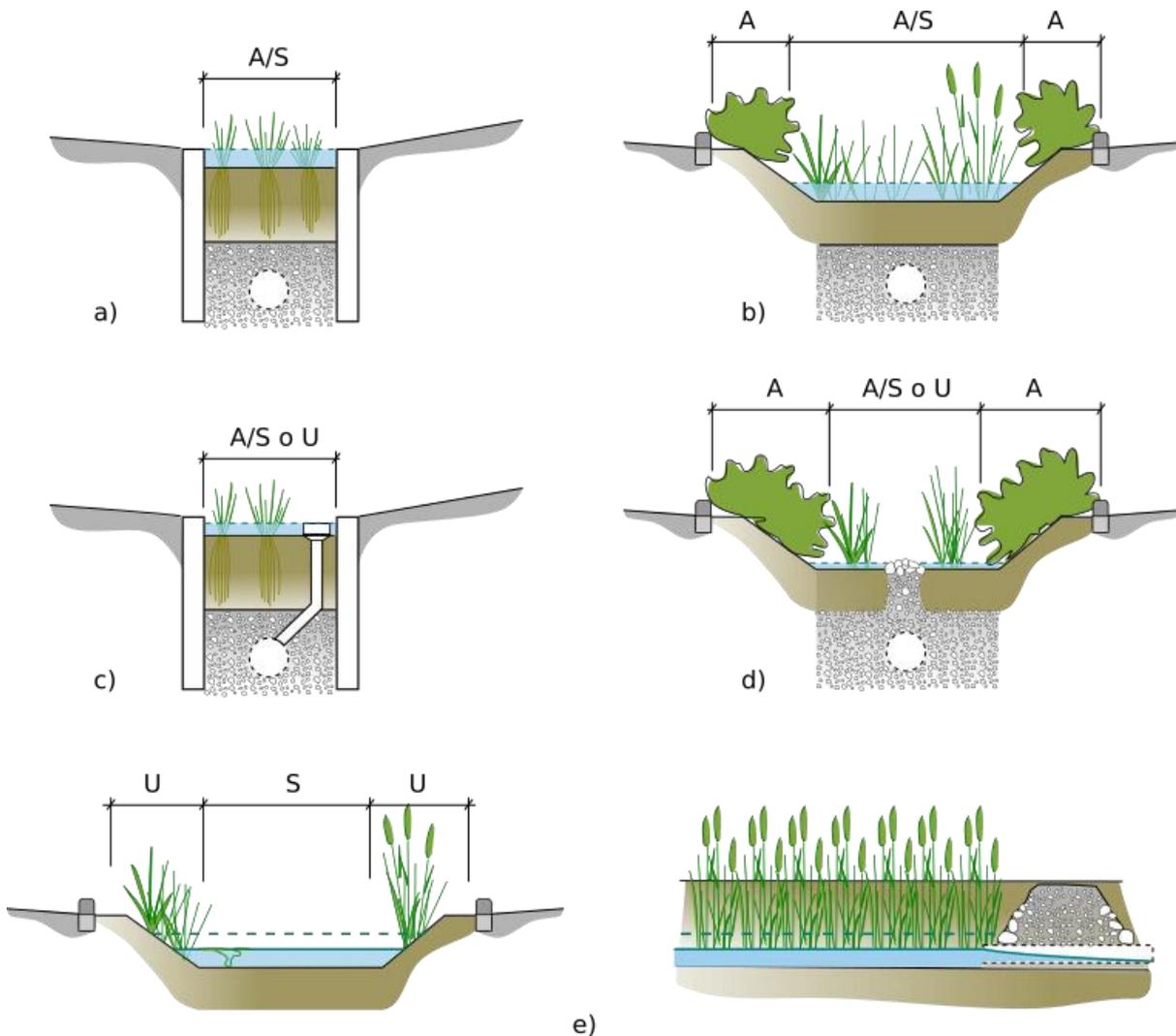


FIGURA 7: DIVERSE TIPOLOGIE DI FOSSI D'INFILTRAZIONE/RITENZIONE (DESCRIZIONE NEL TESTO, U = SUOLO PREVALENTEMENTE UMIDO, S = AREE SOGGETTE A SOMMERSIONE, A = SUOLO PREVALENTEMENTE ASCIUTTO, A/S = ALTERNANZA DI SUOLO ASCIUTTO FINO A CONDIZIONI DI ARIDITÀ E SOMMERSIONE TOTALE).

Il dimensionamento delle opere nasce dal confronto tra l'evento di precipitazione di riferimento, la superficie drenata e le caratteristiche idrologiche dei suoli. La valutazione idrologica porta a scegliere substrati altamente drenanti che massimizzano la capacità di smaltimento delle acque meteoriche. In Lombardia, la normativa sulle opere di dispersione obbliga a considerare una pioggia con tempo di ritorno di 50 anni. Conseguentemente, tranne che per eventi di pioggia eccezionali e relativamente rari (mediamente ogni 50 anni), l'apporto idrico naturale è minimo e ciò condiziona ancora di più la disponibilità idrica di un suolo che, per ragioni tecniche, presenta un elevato numero di macropori e una scarsa capacità ritentiva. Ciò porta ad una riflessione circa le modalità di scelta della vegetazione da impiegare nelle trincee filtranti con vegetazione che sarà più soggetta a stress per mancanza idrica che a fenomeni di anossia per saturazione del terreno.

## Suddivisione in base alla forma della superficie

La forma assunta dalla superficie del fosso di infiltrazione condiziona le condizioni idriche del suolo. Piccoli avvallamenti infatti consentono l'accumulo del materiale fine e delle acqua anche in condizioni di precipitazione non eccezionale e questo può favorire lo sviluppo di una specie piuttosto che un'altra.

In linea generale, è possibile distinguere in due tipologie di fossi di infiltrazione/ritenzione con vegetazione: a superficie piana e a superficie concava.

### *A superficie "piana"*

Sono tipologie di fossi di infiltrazioni che si caratterizzano per avere la superficie sommitale piana (Figura 7-a/c), delimitata da pareti verticali che assicurano l'ottenimento del volume di accumulo desiderato. La sommersione di manifesta in maniera uniforme per tutta la larghezza della trincea. E' in generale una soluzione che si adatta a spazi contenuti e verde di tipo "formale" e "regolare" poiché la condizione di sommersione uniforme limita la scelta delle specie da utilizzare.

### *A superficie "concava"*

E' la tipologia che presenta la superficie modellata a formare un avvallamento con pendenze dolci e uniformi (scarpa 3:1 o superiore) e con punto più basso tipicamente in mezzaria (Figura 7-b/d/e). Per ottenere tale conformazione e assicurare un certo volume di raccolta delle precipitazioni, è necessario che l'area a disposizione sia sufficientemente ampia. La morfologia del terreno comporta livelli di sommersione differenti all'interno della trincea di infiltrazione e ciò, unitamente alla tipologia di suolo, condiziona la scelta delle specie da impiegare: più tollerante allo stress da siccità sulla sommità, più tollerante allo stress da sommersione nella parte basale

E' la soluzione da prediligere in genere quando lo spazio non è un fattore limitante ovvero quando si vogliono creare fasce vegetate di alto valore ambientale.

## Suddivisione in base alle modalità di drenaggio

Anche le modalità di raccolta e smaltimento delle acque costituisce un elemento che va a condizionare le caratteristiche idriche dei suoli che costituiscono i fossi di infiltrazione/ritenzione e conseguentemente la scelta della specie da impiegare. Generalizzando, è possibile riconoscere le seguenti tipologie di fossi di infiltrazione/ritenzione:

### *Drenaggio verticale e con fronte omogeneo*

Il profilo di riempimento è costituito da due strati: quello più superficiale ben drenato e ricco di sostanza organica e quello inferiore costituito prevalentemente da inerti di pezzatura diversa e che costituisce il dreno vero e proprio (Figura 7-a/b). Lo strato drenante ha funzione di immagazzinamento dell'acqua e di aumentare la superficie disperdente ed è dotato di valori elevati di conducibilità idraulica. Lo strato superficiale rappresenta quindi un fattore limitante per la completa efficienza del sistema di accumulo e quindi le indicazioni sono di garantire una permeabilità molto alta.

### *Drenaggio verticale con caditoia*

Per migliorare la velocità di infiltrazione rispetto alla condizione precedente, è possibile installare una caditoia con recapito direttamente nello strato drenante sottostante (Figura 7-c). La quota di sfioro va scelta in base alla quantità di acqua che invece si vuole far infiltrare per lo strato radicato. La gestione a due velocità del processo di infiltrazione ha il vantaggio di poter gestire in maniera differente le acque di "prima pioggia" ovvero la prima parte della precipitazione se non tutta nel caso di piogge poco intense, attraverso lo strato di drenaggio con vegetazione, riducendo quindi l'apporto di inquinanti agli strati sottostanti di suolo e alla

falda. Il funzionamento della caditoia invece, consente di smaltire l'eccesso idrico in tempi utili, immagazzinandolo prima nello strato drenante e quindi disperdendolo nel sottosuolo. La permeabilità dei suoli può essere quindi modulata in base ai tempi permanenza utili all'abbattimento del carico inquinante.

#### *Drenaggio verticale e con fronte eterogeneo*

In alternativa alla soluzione precedente, è possibile realizzare un fronte verticale di materiale grossolano, generalmente inadatto ad ospitare qualsiasi tipo di vegetazione ma in grado di smaltire l'eccesso idrico proveniente dall'immediate vicinanze (Figura 7-d). Questa soluzione consente di sfruttare completamente il volume dei vuoti per finalità di invaso.

Tale tipologia di presta a conformazioni paesaggistiche.

#### *Drenaggio orizzontale*

E' la tipologia di fosso di infiltrazione/ritenzione in cui lo svuotamento del volume di invaso avviene prevalentemente in direzione orizzontale in un recettore superficiale, mediante un terrapieno filtrante ovvero un manufatto di regolazione (Figura 7-e). E' una soluzione che si adatta a condizioni con suoli naturali poco permeabili e falda superficiale. La trincea ha sezione generalmente trapezoidale con gradiente idrico che va dalla saturazione del terreno sul fondo della sezione a condizioni di umidità compatibili con la maggior parte delle specie alle sommità.

E' la tipologia che più si avvicina ai canali di drenaggio tipici delle aree pianeggianti. La scelta delle specie è correlata alle condizioni di saturazione previste.

### 3.3 Suddivisione in strati

Indicativamente, la struttura verticale tipo di un fosso di infiltrazione/ritenzione è così costituita (dall'alto verso il basso): 1) strato pacciamante, 2) strato di coltura, 3) strato drenante.

#### Strato pacciamante

Lo strato pacciamante svolge diverse funzioni tra cui: protezione dall'erosione del suolo sottostante, regolazione termica, riduzione dell'evaporazione e controllo delle infestanti.

In genere è costituito da materiale di tipo grossolano (0.5 – 4 cm) di materiale lapideo (Lapillo vulcanico, ghiaia, ciottoli, scaglie di pietra) o organico (corteccia, paglia, gusci di nocciole, ramaglie triturate, foglie di latifoglie) disposto sulla superficie del suolo a formare uno strato omogeneo di alcuni centimetri di spessore (3-4 cm). In alcuni casi, lo strato pacciamante è associato alla posa di un telo permeabile sottostante in materiale plastico (sconsigliato) o biodegradabile.

La scelta del materiale da utilizzare, oltre che da opportunità di mercato e di costo, è funzionale alla tipologia di verde che si intende realizzare e all'effetto scenico che si intende ottenere.

E' possibile utilizzare materiale pacciamante diverso nel medesimo impianto: ad esempio cortecce sotto chioma e ciottoli lungo le linee di scorrimento principali.

#### Strato di coltura

La Tabella 7 riporta le caratteristiche principali che un suolo per opere di infiltrazione dovrebbe avere. Di base, il suolo "ideale" ha una tessitura prevalentemente sabbiosa, buone capacità idrauliche, una capacità di scambio cationico (CSC) mediamente alta, utile per trattenere i principali inquinanti veicolati dalle acque di

pioggia, un contenuto di sostanza organica significativo, un contenuto di fosforo basso e pH attorno alla neutralità.

A titolo comparativo, lo strato superficiale (fino a 70 cm di profondità) di un suolo agricolo della pianura lodigiana con un contenuto in sabbia del 70% (classificato come franco sabbioso) ha pH attorno alla neutralità, CSC di 12 e contenuto di sostanza organica di 1.2%. L'orizzonte più profondo (> 1.5 m) ha matrice spiccatamente sabbiosa (> 90%) ma con bassissimo contenuto di sostanza organica (circa 0.03%) e CSC di poco superiore a 4 (ERSAL 1996).

Ne consegue che un suolo ideale, oltre a presentare una composizione tessiturale prevalentemente sabbiosa, deve presentare un ottimo contenuto in sostanza organica. Indicativamente, la composizione di un suolo per sistemi di infiltrazione dovrebbe essere composto da: 85% sabbia e 15% materia organica: terra di coltura, torba, compost. Spessore 40-90 cm (Pima County Regional Flood Control District 2015; Anderson 2018).

Suoli prevalentemente sabbiosi hanno un basso contenuto di acqua disponibile per la coltura. Ciò obbliga da un lato, la scelta di specie con limitate esigenze idriche e dall'altro, a preventivare la realizzazione di un impianto di irrigazione. Per aumentare la capacità idrica dei suoli e favorire il processo di infiltrazione è possibile far ricorso ad ammendanti quali agriperlite, argilla espansa, pomice e zeolite, quest'ultimo con una elevata CSC e quindi utile come filtro per gli inquinanti. Altri materiali come la vermiculite non sono adatti perché si sfaldano facilmente e rilasciano particelle fini che con il tempo creano degli strati impermeabili.

TABELLA 7: PARAMETRI CONSIGLIATI DI SUOLI PER INFILTRAZIONE E RIMOZIONE DI INQUINANTI (MODIFICATO DA LOW IMPACT DEVELOPMENT CENTER, INC 2010)

Proprietà	Valori consigliati
tessitura	sabbioso, sabbio limoso, sabbioso limoso o limoso
classe idrologica (CN-SCS)	A o B
conducibilità idraulica	4E05 m/s
CSC	> 10 meq/100 grammi
Contenuto di sostanza organica	1.5 – 10%
P-index	< 25
pH	5.5 – 7.5
spessore dello strato	40 - 90 cm

### Strato drenante

Lo strato drenante è in genere costituito da materiale grossolano con un diametro compreso tra 0.5 e 2.5 cm (ASTM No. 57 in Low Impact Development Center, Inc 2010) per uno spessore di almeno 40-50 cm e in funzione del diametro della condotta di drenaggio se prevista.

### 3.4 La scelta delle specie

La scelta delle specie da inserire in un qualsiasi intervento è condizionata da diversi aspetti come le dimensioni dell'area interessata dall'intervento, gli obiettivi di fruizione che si vogliono raggiungere, le interferenze con altre infrastrutture o edifici, la presenza di utenti "sensibili" (ad esempio alla produzione di allergeni), i vincoli normativi, la diffusione di specie invasive, le caratteristiche microclimatiche e pedologiche dell'area e, non ultimo, l'inserimento paesaggistico ovvero la valenza estetica. Ne consegue che la progettazione di un'area verde a complemento di un'opera prettamente ingegneristica come la trincea filtrante, è un esercizio intellettuale che richiede un'elevata capacità professionale. Non è lo scopo di questo

documento fornire un compendio esaustivo di progettazione del verde, tuttavia si vogliono dare alcune indicazioni, attraverso casi e schemi esemplificativi, per assistere il progettista nelle sue scelte.

Dal punto di vista idrologico, i fossi di infiltrazione presentano caratteristiche idrologiche particolari che mostrano lunghi periodi di siccità associati ad occasionali fenomeni di sommersione più o meno accentuate in quelli di ritenzione.

La tolleranza alla sommersione delle specie è variabile e si può manifestare con adattamenti morfologici e metabolici (Mustroph 2018) anche temporanei e reversibili. La sommersione determina condizioni che riducono gli scambi gassosi e riducono i processi metabolici delle piante che, conseguentemente, vanno incontro al deperimento. Le piante reagiscono mediante strategie adattive come la produzione di speciali tessuti finalizzati ad intrappolare i gas e facilitare gli scambi gassosi delle cellule o modifiche al metabolismo. In letteratura ci sono diversi studi circa la capacità delle specie di adattarsi ai fenomeni di sommersione del solo apparato radicale o dell'intera pianta.

La maggior parte delle ricerche considera una durata significativa di due settimane ma ci sono casi che mostrano segni di deperimento anche solo dopo 48 ore. La pratica progettuale (DWA 2005) e la normativa lombarda in particolare (Regione Lombardia 2017), indicano in 48 ore il tempo di svotamento massimo per cui si ritiene che i danni da sommersione possano ritenersi trascurabili ovvero riconducibili ad una riduzione di produttività della pianta tollerabile rispetto alla rarità dell'evento piovoso atteso che ha tempo di ritorno di 50 anni.

Per contro, l'assenza d'acqua determina una riduzione dell'evapotraspirazione che è alla base dei processi di traslocazione dei nutrienti dal suolo all'interno della pianta e degli scambi gassosi e, conseguentemente, la fotosintesi. Lo stress da insufficienza idrica determina una contrazione della crescita e delle produzioni in generale fino al deperimento dei tessuti nei casi più gravi. Le piante assimilano l'acqua prevalentemente dagli apparati radicali prelevandola dal suolo dove è contenuta adesa alle particelle. Non tutta l'acqua presente nel suolo è però disponibile alla coltura ovvero facilmente assimilabile. I suoli sabbiosi hanno tipicamente una bassa capacità idrica e quindi, in questi casi, le piante vanno più facilmente in contro a stress idrici.

Anche la tolleranza alla siccità dipende dalla specie e, all'interno della specie, anche dalla cultivar. Le piante si difendono dagli effetti della siccità adattandosi dal punto di vista morfologico (aumentando la profondità dell'apparato radicale, creando tessuti in grado di immagazzinare acqua, adottando stati di quiescenza) che metabolico (Butt 2017).

Di seguito vengono proposte alcuni modelli di vegetazione con elenchi di specie da impiegare. Ad eccezione delle specie igrofile, adatte ad ambienti di tipo "S", le altre specie sono in genere adatte a condizioni di scarsità idrica e vengono raggruppate in base al loro ingombro in relazione alla larghezza dell'opera drenante. Ciò non toglie, tuttavia, la possibilità di usare soluzioni miste ovvero di estendere l'applicabilità di alcune tipologie generalmente a situazioni dotate di maggior spazio per ragioni estetiche o funzionali.

### Graminacee perenni ornamentali

L'utilizzo delle graminacee ornamentali come elemento vegetale di copertura trova riscontro sia in aiuole di piccole dimensioni che in grandi spazi creando soluzioni paesaggistiche di interesse per le forme allungate delle foglie, la consistenza eterea delle infiorescenze e la varietà di colorazione.

Le specie graminacee da inserire nei sistemi di infiltrazione devono essere tolleranti alla scarsità idrica e, a seconda dei casi, ad esposizioni soleggiate o in ombra, comunque su suoli asciutti.



FIGURA 8: ESEMPIO DI TRINCEA FILTRANTE, AIUOLA RIBASSATA CON GRAMINACEE ORNAMENTALI IN CONTESTO FORTEMENTE URBANIZZATO (LOW IMPACT DEVELOPMENT CENTER, INC 2010).

In contesti densamente urbanizzati, caratterizzati da microclimi caldi e asciutti e lontani da ambienti naturali, è possibile far ricorso a specie ornamentali esotiche dotate di grande capacità adattiva a condizioni estreme. La maggior parte delle cultivar in commercio ha origine dalle praterie delle Americhe. Si consiglia sempre di verificare che la specie non venga inserita nelle liste delle piante indesiderate che sono in continuo aggiornamento.

La Tabella 8 riporta alcune specie che è possibile utilizzare come elementi di copertura.

TABELLA 8: ALCUNE SPECIE A PORTAMENTO ERBACEO ADATTE ALLE TRINCEE FILTRANTI.

Nome	altezza (cm)	esposizione	origine	densità di impianto (piante/m2)
Luzula nivea	30-40	mezz'ombra	locale	6-8
Cortaderia selloana	300	soleggiato	sud America,	1
Pennisetum alopecuroides e varietà	60-70	pieno sole		3
Festuca glauca	15-20	sole /mezz'ombra	Alpi	8-10
Stipa tenuissima	50-80	pieno sole	sud America	2-3
Panicum virgatum varietà	80-120/180-200	sole	nord america	3
Liriope muscari	30-35	mezz'ombra/ombra	Asia orientale	7
Hemerocallis hybrida	40 – 50	sole / mezz'ombra, potrebbe necessitare di irrigazione per una buona fioritura	ibrido	7
Echinacea purpurea	10-40	sole, tollerante al secco	nord america	8-10
Molinia caerulea	20	sole	locale	1
Carex buchananii	60	sole, arido	Nuova Zelanda	6
Carex flacca	25-35	sole, arido	locale	7

## Prato polifita

La creazione di un prato polifita ovvero ottenuto da sementi miste di graminacee e leguminose, costituisce una valida soluzione economica per la copertura degli avvallamenti con trincee drenanti (Figura 9). Le operazioni manutentive possono essere ridotte a soli tagli occasionali di governo e pulizia dell'area e ad irrigazioni di soccorso, donando un aspetto naturale all'impianto e fornendo habitat utili alla fauna. La presenza di più specie nel miscuglio garantisce una rapida copertura delle superfici, una migliore adattabilità alle condizioni ambientali anche localizzate e una maggior valenza ambientale.

La Tabella 9 riporta due tipologie di miscele di sementi da utilizzare.



FIGURA 9: ESEMPIO DI VALLO CON PRATO POLIFITA (DA [WWW.IOWASTORMWATER.ORG](http://WWW.IOWASTORMWATER.ORG)).

TABELLA 9: COMPOSIZIONE MISCELE DI SEMI PER AMBIENTI SOGGETTI A FENOMENI DI SICCATÀ.

condizioni pedo-climatiche	miscela	fonte
terreni sciolti di natura calcarea, anche con scheletro grossolano	Dactylis glomerata L. (30%) Bromus inermis LEYSER (30%) Festuca rubra L. (15%) Poa pratensis L. (10%) Trifolium pratense L. (10%) Lotus corniculatus L. (5%)	manuale SNAM citato in Regione Piemonte, 2003
terreni ripidi basici	Festuca rubra L. (15%) Festuca pratensis HUDSON (24%) Arrhenatherum elatius (L.) PRES (10%) Poa pratensis L. (10%) Dactylis glomerata L. (5%) Lolium perenne L. (5%) Trifolium repens L. (4%) Trifolium pratense L. (2%) Lotus corniculatus L. (4%)	manuale tecnico di ingegneria naturalistica Regione Emilia Romagna e Regione Veneto

	Phleum pretense L. (3%) Achillea millefolium L. (2%) Agrostis tenuis SIBTH. (2%) Lathyrus pratensis L. (2%) Medicago lupulina L. (2%) Onobrichis viciifolia SCOP. (2%) Sanguisorba minor SCOP. (2%) Anthyllis vulneraria L. (1%) Carum carvi L. (1%) Cynosurum cristatus (1%) Trisetum flavescens (L.) BEAUV. (1%) Vicia sativa L. (1%) Daucus carota L (0.8%) Leuchanthemum vulgare LAM. (0.2%)	
--	---	--

### Specie a portamento arbustivo per avvallamenti di medie dimensioni

Per trincee drenanti di medie dimensioni (2 - 5 m in larghezza) è possibile fare ricorso a piante a portamento arbustivo. Anche in questo caso la scelta dovrebbe ricadere su specie autoctone o ampiamente diffuse ovvero non presenti negli elenchi delle specie indesiderate. In ambiente antropizzati, è possibile fare ricorso a varietà coltivate. La Tabella 10 riporta alcune specie facilmente reperibili dai produttori florovivaistici utilizzabili in aiuole disperdenti.

TABELLA 10: ALCUNE SPECIE A PORTAMENTO ERBACEO ADATTE ALLE TRINCEE FILTRANTI.

Nome	altezza (cm)	larghezza (cm)	esposizione	origine	densità di impianto (piante/m2)
Potentilla fruticosa	45-60	45 -90	sole/mezz'ombra	ibrido da giardino	3 – 4
Hypericum Hidcote	fino a 150	fino a 250	sole	ibrido da giardino	3 – 4
Hypericum Calycinum	20-60	>150	sole	Bulgaria e Turchia	5 – 6
Lavandula spp.	30-100	30-80	sole	area mediterranea/ibrido da giardino	8 – 11
Salvia spp.	60-70	120	sole	area mediterranea/ibrido da giardino	8 – 11
Hibiscus syriacus	150-200	70-100	sole	Asia/ibrido da giardino	3 – 4
Rosa spp.	150	120	sole	autoctone/ibrido da giardino	3 – 4
Cytisus scoparius	150-200	100-150	sole	Europa/Asia/Africa/ibrido da giardino	3 – 4

### Specie a portamento arbustivo per avvallamenti di grandi dimensioni

Per avvallamenti e trincee drenanti di grandi dimensioni (maggiori di 10 m in larghezza) ovvero bacini di infiltrazione, si consiglia il ricorso a specie autoctone tipiche degli ambienti perifluviali (Figura 10). Tali ambienti, infatti, sono naturalmente caratterizzati da suoli con matrice sabbiosa, spesso con scheletro prevalente e soggetti a forte escursioni idriche regolate dalle dinamiche fluviali. Le dimensioni di tale opere consentono inoltre di favorire la creazione di habitat utili per la fauna e hanno una importante valenza ecosistemica. Le specie consigliate sono rustiche, facilmente riproducibili per talea e quindi adatte all'uso nelle opere di ingegneria naturalistica.

Le specie maggiormente utilizzate sono: *Salix alba*, *Salix fragilis*, *Salix purpurea*, *Salix triandra*, *Populus nigra*. Le piante hanno portamento prevalentemente arbustivo ma anche arboreo (*S. alba*, *P. nigra*). In quest'ultimo caso sarà necessario intervenire con tagli di ringiovanimento, capitozzatura e sfollo per contenere la biomassa voluminosa.



FIGURA 10: ESEMPIO DI AVVALLAMENTO DI DISPERSIONE CON VEGETAZIONE ARBUSTIVA.

### Specie a portamento arboreo

L'utilizzo di piante a portamento arboreo segue in genere le regole d'impianto tipiche della progettazione del verde e quindi la scelta della specie dipenderà dalla disponibilità di spazio, la presenza di infrastrutture e sotto-servizi nelle vicinanze, consuetudini locali ed esigenze paesaggistiche.

In genere l'impianto di essenze arboree si adatta a fossi di infiltrazione di grandi dimensioni e aree verdi filtranti e le piante vengono posizionate ai lati, nel punto più alto della concavità in modo da ridurre gli stress dovuti alle condizioni di anossia determinati dalla saturazione dei suoli nelle fasi di allagamento.



FIGURA 11: "ISOLE" DI INFILTRAZIONE CON PIANTE ARBOREE E FOSSO DI INFILTRAZIONE IN PRIMO PIANO.

### Specie particolarmente adatte alle zone umide dei fossi di ritenzione



FIGURA 12: FOSSO DI LAMINAZIONE/INFILTRAZIONE IN CONTESTO URBANO CON VEGETAZIONE IGROFILA DI SPONDA.

Laddove siano previsti frequenti fenomeni di allagamento e accumulo idrico nella parte più bassa dei fossi e nei bacini di ritenzione, è possibile utilizzare le specie tipiche degli ambienti umidi e palustri (Figura 12). Un elenco utile per finalità progettuali è quello riportato in Tabella 11.

TABELLA 11: ELENCO DELLE SPECIE ADATTE A FOSSI DI RITENZIONE DI COMUNE REPERIBILITÀ. U = AMBIENTI UMIDI DI RIPÀ, U/S AMBIENTI CON SUOLI SATURI E SOMMERSIONE FREQUENTE, S = AMBIENTI SOMMERSI (MODIFICATO DA ERSAF 2019)

Nome comune	Nome scientifico	U	U/S	S
Calta palustre	Caltha palustris		x	
Carice tagliante	Carex acutiformis	x		
Olmara comune	Filipendula ulmaria	x		
Giaggiolo acquatico	Iris pseudacorus	x	x	
Giunco comune	Juncus effusus	x	x	
Salcerella comune	Lythrum salicaria	x		
Menta acquatica	Mentha aquatica	x		
Ninfea gialla	Nuphar lutea			x
Limnantemio	Nymphoides peltata			x
Lisca lacustre	Schoenoplectus lacustris	x	x	
Felce palustre	Thelypteris palustris	x		
Cannuccia di palude	Phragmites australis	x	x	
Lisca maggiore - mazzasorda maggiore	Typha latifolia	x	x	

### 3.5 Cure colturali

#### Concimazione

La concimazione è solitamente non necessaria e comunque da evitare nelle aree di infiltrazione/ritenzione sia per contenere la dispersione dei nutrienti che i fenomeni di eutrofizzazione. Le piante proposte nelle tabelle precedenti sono in genere poco esigenti dal punto di vista nutrizionale.

#### Irrigazione

L'irrigazione può essere necessaria nei primi mesi di sviluppo della vegetazione fino a quando l'apparato radicale non sia ben consolidato. In ambienti particolarmente fruibili, può essere necessario garantire un certo grado di apporto idrico in modo da mantenerne le caratteristiche decorative delle piante ed evitare il disseccamento della parte epigea della pianta, anche se questo non comporta la morte della stessa, o per mantenere prolungata la fioritura.

Quindi, in generale, è opportuno prevedere sia delle irrigazioni di soccorso per almeno due stagioni vegetative consecutive e la posa di un impianto di irrigazione per installazioni in aree particolarmente frequentate (strade cittadine, parchi, centri commerciali, ecc.).

#### Operazioni di manutenzione

Per il corretto mantenimento funzionale dei fossi e dei bacini di infiltrazione/ritenzione, occorre prevedere le seguenti attività:

##### *Taglio della vegetazione*

Il taglio della vegetazione serve a regolare la crescita delle piante, ringiovanire i tessuti e rimuovere le parti ammalate. A seconda della specie e della stagione di crescita, si interverrà con metodi e intensità differenti. In un prato con finalità naturalistiche, si interverrà con sfalci saltuari (2/3 volte all'anno) possibilmente sfalsati nello spazio in modo da mantenere una certa disponibilità di habitat. Il taglio ha lo scopo di rimuovere la biomassa, le parti secche e favorire la ricrescita vegetale. Piante erbacee perenni in genere richiedono un unico taglio a raso all'inizio della stagione vegetativa. La vegetazione arbustiva necessita invece di una

potatura vigorosa durante il periodo invernale mentre è sufficiente un taglio di contenimento durante la stagione vegetativa. Le piante a portamento arboreo richiedono invece potature dilazionate negli anni per la rimozione delle parti secche o pericolanti.

#### *Rimozione delle infestanti*

Al pari di una qualsiasi impianto verde, è necessario controllare la diffusione delle infestanti, soprattutto nelle prime fasi di sviluppo della vegetazione desiderata. Con la posa dello strato pacciamante si contiene la diffusione della maggior parte delle malerbe, limitando le attività di gestione alla rimozione manuale di pochi soggetti. Per le caratteristiche delle opere di infiltrazione/ritenzione, è assolutamente da evitare l'uso del diserbo chimico.

#### *Rimozione dei sedimenti*

Lungo le linee di deflusso e di infiltrazione, soprattutto se coperte di massi, è necessario intervenire periodicamente con la rimozione del sedimento fine che, depositandosi tra i ciottoli, riduce la permeabilità dello strato superficiale.

## 4 Valutazione costi/benefici delle opere di drenaggio urbano sostenibile

Gli interventi di drenaggio urbano sostenibile e, in particolare, quelli che prevedono l'uso della vegetazione, sono sempre più oggetto di attenzione per la loro capacità di fornire una moltitudine di beni e servizi come la riduzione dell'inquinamento delle acque, la riduzione della produzione di carbonio e altri gas inquinanti, la riduzione del consumo energetico e più genericamente, una migliore qualità di vita degli ambienti urbani che si manifesta anche con un incremento di valore delle proprietà. Non ultimo, le infrastrutture verdi e le opere a verde in particolare, favoriscono lo sviluppo di una maggiore resilienza dei sistemi urbani ai cambiamenti climatici.

Nell'analisi costi/benefici presentata in questo paragrafo, oltre ad alcune tipologie classiche di interventi di drenaggio urbano sostenibile (tetti verdi, fossi di infiltrazione, pavimentazioni permeabili e cisterne), verranno considerati anche quelli relativi al verde urbano in generale poiché, come spiegato in seguito, la semplice presenza delle piante può avere effetti significativi sul ciclo idrologico degli ambienti antropizzati.

Rispetto alla moltitudine di benefici riconosciuti per le diverse tipologie di opere considerate (Figura 13), verranno analizzati in particolare quattro indicatori: 1) gli effetti sulla riduzione dei costi di raccolta e trattamento delle acque meteoriche 2) gli effetti sui consumi energetici per raffrescamento, 3) gli effetti sulla riduzione della CO<sub>2</sub> e 4) l'aumento di disponibilità idrica.

Le diverse soluzioni considerate possono vantare benefici diversi. Tutte hanno naturalmente effetti positivi sulla gestione del deflusso ma solo le opere a verde hanno un effetto attivo nella contrazione della produzione di CO<sub>2</sub> e solo la raccolta diretta della precipitazione ha un effetto diretto sull'uso della risorsa idrica.

Benefici	Riduzione runoff										Migliore qualità di vita della comunità							
	minori costi di depurazione	salvaguardia della qualità dell'acqua	minori investimenti in opere "grige"	riduzione del rischio alluvioni	maggiore disponibilità idrica	maggiore ricarica della falda	riduzione dell'uso di sale	riduzione del consumo energetico	migliore qualità dell'aria	riduzione emissioni CO <sub>2</sub>	riduzione isole di calore	valore estetico	opportunità per attività ricreative	riduzione inquinamento acustico	maggiore coesione sociale	agricoltura urbana	disponibilità di habitat	educazione ambientale
<b>Interventi</b>																		
tetti verdi	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	○	●	○	○	○	○
verde urbano	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○
fossi di infiltrazione	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
pavimenti permeabile	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
cisterne	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

modificato da CNT, 2010      ● presente      ○ parziale      ○ assente

FIGURA 13: VISTA DI INSIEME DEI BENEFICI APPORTATI DALLA DIFFUSIONE DI DIVERSE TIPOLOGIE DI INTERVENTI DI DRENAGGIO URBANO SOSTENIBILE.

Si noti inoltre che, per le finalità comparative dell'analisi, sia i costi che i benefici sono considerati immutabili nel tempo.

## 4.1 Costo di realizzazione/manutenzione

La stima del costo di realizzazione di un qualsiasi intervento è strettamente correlata alle caratteristiche dell'opera stessa, al contesto in cui si inserisce, alla disponibilità di mezzi e materiali, all'accessibilità del cantiere e al costo della manodopera. Per finalità di pianificazione e programmazione, è tuttavia possibile fare riferimento ai costi standard.

La Tabella 12 riporta i valori minimi e massimi per i costi, *CUNI*, di alcune opere di drenaggio urbano sostenibile. I valori analizzati derivano da diversi studi sull'argomento (Domènech & Saurí 2011; Assoverde 2017; Masseroni et al. 2018; Van Seters et al. 2013; Yu et al. 2018; Roman 2014; McPherson et al. 2005) o da valutazioni specifiche, sulla base dell'elenco prezzi della Regione Lombardia (2019).

I dati sono stati omogeneizzati per renderli comparabili applicando le opportune trasformazioni di valuta, di aggiornamento temporale ed escludendo, se necessario eventuali valori anomali attribuibili alle specificità delle condizioni considerate.

Allo stesso modo, vengono riportati anche i costi minimi e massimi di manutenzione, *CMAN*, per ogni anno di vita dell'opera, anch'esso riportato in Tabella 12.

TABELLA 12: COSTI STANDARD DI ALCUNE TIPOLOGIE DI INTERVENTI (YU ET AL. 2018, VALORE CONVERTITO E ATTUALIZZATO)

Intervento	U.M	costo di impianto, CUNI		costo di manutenzione, CMANUNI		durata, DUR anni
		min	max	min	max	
tetti verdi	m <sup>2</sup>	89.63 €	183.27 €	0.96 €	27.59 €	40
alberature	cad	122.21 €	397.30 €	6.31 €	49.87 €	50
fossi di infiltrazione	m <sup>2</sup>	32.33 €	796.15 €	0.14 €	13.84 €	40
pavimenti permeabili	m <sup>2</sup>	24.00 €	125.06 €	0.05 €	1.82 €	40
cisterne	m <sup>3</sup>	110.00 €	2,710.00 €	0.10 €	25.07 €	30

Occorre inoltre precisare che in alcuni casi, le opere a verde sostituiscono anche solo parzialmente le opere tradizionali per cui al costo totale dell'opera va sottratto il costo dell'elemento sostituito, *CSOST*.

Per esempio, al costo del tetto verde va sottratto il costo di copertura di un tetto tradizionale che, considerando l'area del milanese, è di circa 30 euro/m<sup>2</sup>. Allo stesso modo, anche nel caso delle pavimentazioni permeabili, occorre sottrarre il costo di una pavimentazione "tradizionale" in asfalto e pari a circa 19 euro/m<sup>2</sup>.

Il costo totale dell'opera si calcola quindi come:

$$CTOT = SUP * (CUNI - CSOST)$$

Mentre il costo di manutenzione annuale si calcola come:

$$CMAN = SUP * CMANUNI$$

## 4.2 Benefici per minori costi di raccolta e trattamento delle acque meteoriche

La valutazione economica del beneficio ottenuto dalla possibile riduzione dei volumi d'acqua derivanti dalla gestione delle acque meteoriche, necessita della determinazione dei volumi distolti dalle opere di drenaggio

urbano sostenibile e il loro effetto in termini di risparmio dei costi di smaltimento e gestione e valore aggiunto dato dalla disponibilità di risorse idriche di buona qualità.

La procedura descritta differisce da quella comunemente impiegata in sede di dimensionamento e progettazione delle opere perché fa riferimento a condizioni medie e, in genere, non considera eventi eccezionali che invece hanno un significato maggiore nel caso della gestione del rischio idraulico.

In termini generali, il volume d'acqua,  $VDEP$  ( $m^3$ ), sottratto dalle opere di drenaggio urbano sostenibile ai processi di raccolta e depurazione, è calcolato come:

$$VDEP = PCUM * SUP * EFFT * 10^{-3}$$

dove  $PCUM$  (mm) è la precipitazione cumulata annua,  $SUP$  ( $m^2$ ) è la superficie di riferimento variabile a seconda delle opere,  $EFFT$  è l'efficienza di immagazzinamento del sistema.

Nel caso dei tetti verdi, la superficie di riferimento  $SUP$  è quella dell'opera stessa mentre l'efficienza di immagazzinamento è complementare alla capacità di generare deflusso. Indicativamente, la capacità di generare deflusso di un tetto verde va in media da 0.2 – 0.6. Il regolamento di invarianza assegna un valore cautelativo di 0.7 che può essere ragionevolmente applicato per tenere conto di precipitazioni particolarmente intense ( $T > 50$  anni), per cui l'efficienza di immagazzinamento del tetto verde va dall'80 al 30%.

Va inoltre osservato che, rispetto ad una condizione media, possono esistere diversi fattori locali che hanno effetto sulla capacità ritenitiva dei tetti verdi come:

1. la distribuzione nel tempo e l'intensità delle precipitazioni: eventi molto ravvicinati tra loro ovvero rari ma particolarmente intensi possono compromettere le capacità ritenitive del tetto verde;
2. la condizione di umidità del suolo prima dell'evento di pioggia, determinata ad esempio dalle irrigazioni, se elevata, riduce la capacità di accumulo del substrato;
3. la morfologia del tetto e in particolare la pendenza delle falde, se piatto garantisce una maggior capacità di immagazzinamento
4. la struttura del "pacchetto" che costituisce lo strato assorbente del tetto verde ovvero la profondità dello stesso può influenzare la capacità di ritenzione dell'opera.

Nel caso delle alberature, la superficie di riferimento è la superficie della proiezione a terra della chioma delle piante. La capacità di intercettazione delle piante sarà determinata dalla dimensione delle chiome, dalle caratteristiche delle foglie, dallo stato vegetativo e dall'intensità della pioggia, per cui l'efficienza di immagazzinamento varia considerevolmente.

Un sistema di infiltrazione, invece, se correttamente progettato, riesce a intercettare la quasi totalità delle precipitazioni. In termini cautelativi, è possibile considerare un valore di  $EFFT$  pari all'80% (CNT 2010) mentre la superficie di riferimento,  $SUP$ , sarà data dalla somma dell'area del sistema di infiltrazione e dell'area impermeabile ad esso collegata ed è in media pari a 10-20 volte la superficie dell'impianto di infiltrazione (DWA 2005).

Diversi studi hanno inoltre dimostrato che le pavimentazioni permeabili possono gestire dal'80 al 100% della precipitazione (CNT 2010). Tale capacità varia naturalmente a seconda di diversi fattori come l'intensità e durata della precipitazione, la pendenza della superficie, le caratteristiche del suolo sottostante e il grado di manutenzione della pavimentazione.

La possibilità di accumulare la precipitazione tramite l'uso di volumi di immagazzinamento ("cisterne") è funzione di diversi fattori quali la quantità di precipitazioni, la superficie impermeabile collettata e l'efficienza di immagazzinamento, dovuta ad eventuali perdite del sistema di collettamento delle aree drenate. Indicativamente, si stima una efficienza di immagazzinamento pari all'85%. Oltre ai suddetti fattori, anche le variabili temporali e sito specifiche possono influenzare la capacità di immagazzinamento delle cisterne come l'intensità e la frequenza delle precipitazioni e le possibilità, i tempi e i modi di riuso dell'acqua immagazzinata.

La Tabella 13 riporta una sintesi delle ipotesi fatte.

TABELLA 13: PARAMETRI PER IL CALCOLO DEL VOLUME DI IMMAGAZZINAMENTO.

Tipo di intervento	Superficie di riferimento, SUP (m <sup>2</sup> )	di Efficienza di immagazzinamento, EFFT (%)	di Note
tetti verdi	superficie del opera	30-80	calcolato come reciproco della capacità di deflusso
alberature	superficie dell'area x % di copertura	2.4 – 36.9	(Xiao et al. 1998)
fossi di infiltrazione	superficie dell'opera + area collettata	70-80	
pavimenti permeabili	superficie dell'opera	70-100	(CNT, 2010)
cisterne	area collettata	85	

Per il calcolo del beneficio della riduzione di acqua meteorica da dover gestire, occorre considerare i diversi effetti che tale riduzione ha a livello di minori costi di trattamento delle acque luride e i minori costi per impianti tecnologici.

Il beneficio dovuto al mancato smaltimento delle acque luride, *BDEP*, si calcola come costo di trattamento unitario, *CDEP* (euro/m<sup>3</sup>), per il volume d'acqua sottratta al sistema di smaltimento. Indicativamente, per la provincia di Milano, il costo di trattamento delle acque luride è pari a 0,71 euro/m<sup>3</sup> (esclusi i costi fissi, CAP 2018).

$$BDEP = VDEP * CDEP$$

La riduzione del volume di acque che confluiscono nei sistemi di fognatura convenzionali comporta una riduzione dei costi degli impianti stessi che dovranno essere dimensionati su volumi inferiori d'acqua da trattare. La stima rigorosa del risparmio dovuto a minori opere di smaltimento delle acque reflue richiede la conoscenza di variabili e caratteristiche locali.

E' tuttavia possibile stimare il possibile beneficio, *BFOG*, mediante un procedimento comparativo con esperienze analoghe. Ad esempio, per la città di Portland (Evans 2008), si stima il costo per opere di smaltimento delle acque reflue, *CFOG*, in 26 euro/m<sup>2</sup> di superficie asservita.

Ne consegue che, il risparmio dovuto ad una minore produzione di runoff è pari a:

$$BFOG = SUP * CFOG * EFFT$$

### 4.3 Benefici per la riduzione dei rischi connessi alle esondazioni

Una rigorosa analisi dei benefici connessi alla riduzione dei rischi dovuti ai fenomeni alluvionali richiederebbe un approfondimento sito specifico relativo all'effettiva pericolosità idraulica e vulnerabilità del territorio che esula dalle finalità della metodologia proposta. Al contrario è possibile adottare un metodo comparativo sulla base della stima del costo equivalente alle opere di laminazioni che si ritiene necessarie per controllare le possibili criticità.

Applicando il metodo delle sole piogge per un tempo di ritorno di 10 anni, è possibile stimare il volume specifico di laminazione,  $VLAM$  ( $m^3/ha$ ), calcolato rispetto alla superficie impermeabile.

Ne consegue che, il risparmio dovuto ad una riduzione dei costi connessi alla gestione dei volumi connessi ai fenomeni alluvionali,  $BLAM$ , è pari al costo necessario per la realizzazione di un vaso di laminazione per contenere il volume d'acqua che viene trattenuta dall'opera in progetto, ovvero:

$$BLAM = VLAM * SUP * EFFT * CLAM$$

### 4.4 Benefici per il risparmio energetico

La presenza di vegetazione in prossimità degli edifici può avere effetti anche sul bilancio energetico degli edifici stessi. Ciò è particolarmente significativo nel caso dei tetti verdi e del verde urbano.

Il beneficio energetico si realizza solo in alcune situazioni dipendenti dalle caratteristiche climatiche dell'area di riferimento, la tipologia di costruzione, la posizione relativa dell'impianto "verde" rispetto al volume edificato e in genere è maggiore il risparmio energetico a livello di raffrescamento rispetto al riscaldamento (Francis & Jensen 2017).

Nel caso dei tetti verdi, la copertura data dal "pacchetto" a strati impermeabili, strati di supporto, suolo e vegetazione ha una trasmittanza termica che è circa la metà rispetto, ad esempio, a quella di un tetto convenzionale (CNT 2010) e quindi ha un potere isolante maggiore. Indicativamente, un tetto verde ha trasmittanza compresa 0,38 e 0,53  $W/m^2 \cdot K$  (Alcazar & Bass 2005). L'aggiunta di uno strato coibentante sul fondo consente di ottenere una trasmittanza di 0,25  $W/m^2 \cdot K$  (Berto et al. 2015) che è circa 1/5 di quella di un tetto non coibentato e comparabile con quella di un tetto coibentato tradizionale (provincia di Torino 2005).

Sebbene alcune indagini considerino l'effetto coibentante significativo per la stima dei benefici aggiuntivi dell'installazione di un tetto verde (CNT 2010), dal momento che è possibile utilizzare altri sistemi di isolamento spesso con un rendimento maggiore e minori costi di installazione, si è preferito non considerare questo aspetto nell'analisi.

Il tema della riduzione dell'effetto "isola di calore" e dei costi di climatizzazione degli edifici nel periodo estivo è invece di maggior interesse, considerando che la richiesta di energia per il raffrescamento tende ad un progressivo aumento negli anni anche nell'area del milanese come mostrato in Figura 14.

Alcuni studi segnalano una riduzione significati delle temperature dell'ambiente nel caso della presenza di tetti verdi e alberature (Spala et al. 2008; Getter et al. 2011; Santamouris 2014; Slingerland 2012; Coma et al. 2016).

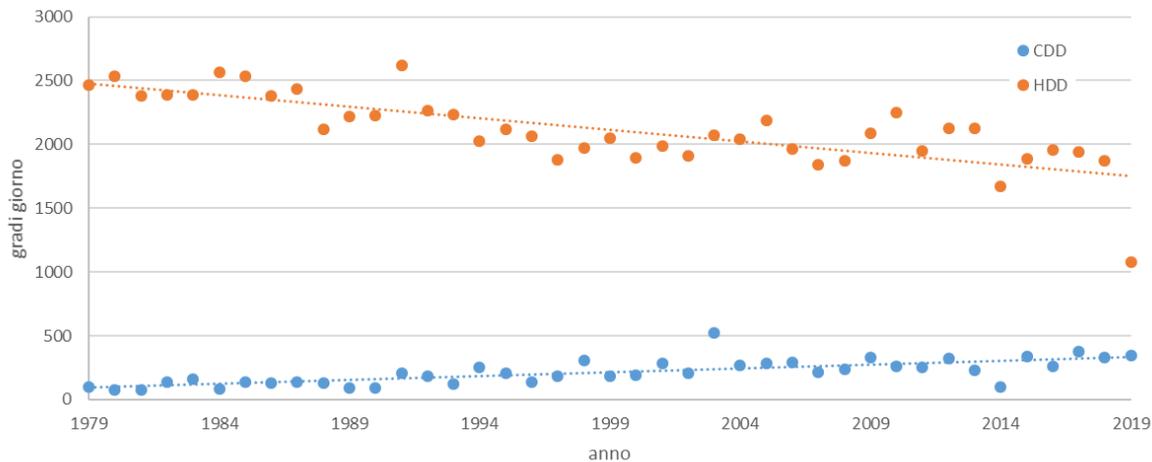


FIGURA 14: VARIAZIONE DEI GRADI GIORNO PER IL RISCALDAMENTO, HDD, E IL RAFFRESCAMENTO, CDD, NEGLI ANNI (ELABORATO DA DATI EUROSTAT).

Il meccanismo di raffrescamento ad opera della vegetazione è dovuto sia all'effetto di ombreggiamento delle chiome, particolarmente significativo nel caso delle alberature, ma anche al processo fisiologico della traspirazione. Le piante, infatti, per il proprio sviluppo e sostentamento necessitano di liberare un certo quantitativo di vapore acqueo nell'ambiente attraverso un processo detto di evapotraspirazione. Tale processo è generalmente maggiore durante la stagione vegetativa e quindi, in assenza di stress idrici o temperature eccessivamente alte per la tipologia di pianta (Konarska et al. 2016), durante i mesi più caldi dell'anno, proprio quelli durante i quali le richieste di energia per il raffrescamento sono maggiori.

Per evaporare, l'acqua necessita di energia che viene sottratta dall'ambiente e non viene immagazzinata dalle masse inerti che caratterizzano gli ambienti urbanizzati (pareti, tetti, ecc.) e che poi la rilasciano sotto forma di calore irradiato, determinando un aumento localizzato delle temperature.

Alcuni studi (Environmental Affairs Department City of Los Angeles 2006; GSA 2011; Santamouris 2014) stimano che la sostituzione o l'introduzione dei tetti verdi nei contesti urbanizzati può ridurre la temperatura media di alcuni gradi (3-5) anche per basse percentuali di copertura dei sistemi verdi (15% della superficie urbana).

L'ENEA (Cesaratto & De Carli 2010) riporta i fabbisogni energetici per raffrescamento di alcune tipologie di edifici ad uso residenziale e terziario per diverse città italiane (Milano, Roma e Palermo). Dall'analisi dei risultati dello studio e confrontando tali valori con le temperature medie estive registrate nelle località considerate, si vede come per ogni grado di temperatura corrisponda una variazione dei fabbisogni energetici di 9 e 14 kWh/m<sup>2</sup> rispettivamente per un edificio residenziale e terziario con una variazione media di 11 kWh/(C m<sup>2</sup>).

Nell'ipotesi di considerare cautelativamente una variazione di temperatura media di 1-2 ° C e che ad ogni unità di superficie calpestabile corrisponda una unità coperta con tetto verde (edifici ad un solo piano), ci si attende un risparmio energetico annuo di 11 – 22 kWh per ogni metro quadrato di superficie abitabile per il solo raffrescamento.

Nel caso delle alberature, l'effetto che le piante hanno sui consumi energetici degli edifici è dovuto sia all'ombreggiamento delle superfici che ai processi evapotraspirativi. Una stima rigorosa del contributo delle piante richiede la definizione di una serie di dettagli come le dimensioni della pianta, lo stato vegetativo e la posizione relativa agli edifici circostanti (Morille et al. 2016; Skelhorn et al. 2016; Wang & Akbari 2016).

Considerando una condizione generica, con piante distribuite uniformemente all'interno di un'area urbanizzata, è possibile utilizzare i valori medi di risparmio energetico per pianta riportati in Tabella 14.

TABELLA 14: RISPARMIO ENERGETICO PER RAFFRESCAMENTO PER DIVERSE TIPOLOGIE DI PIANTE D'ALTO FUSTO (McPHERSON ET AL. 2006).

latifoglia piccola taglia	latifoglia media taglia	latifoglia grande taglia	conifere	anni
46	40	69	50	20
44	53	89	66	40

Le piante, inoltre, possono avere effetti anche nel periodo invernale ma in questa analisi si è preferito considerare cautelativamente questo effetto come trascurabile.

#### Calcolo del valore per risparmio energetico

Il valore attribuibile al risparmio energetico per minori esigenze di raffrescamento, *BCOOL*, è quindi stimabile moltiplicando l'energia risparmiata per raffrescamento, *RCOOLTOT*, per il costo medio dell'energia, *CEN*.

$$BCOOL = RCOOLTOT * CEN$$

Ad esempio, il costo dell'energia elettrica è di 0.2067 euro/kWh (calcolato rispetto all'anno 2019, fonte ARERA, [www.arera.it](http://www.arera.it)).

#### 4.5 Benefici per la sottrazione diretta e indiretta di CO<sub>2</sub>

Per sottrazione diretta di CO<sub>2</sub> si intende la quota di carbonio che viene sottratta dall'atmosfera e immagazzinata nei tessuti delle piante.

Gli interventi che consentono una riduzione diretta della CO<sub>2</sub> sono naturalmente quelli che prevedono l'utilizzo di piante vive e quindi principalmente tetti verdi, verde urbano, fossi di infiltrazione.

In termini generali, la quantità di CO<sub>2</sub> sequestrata, *CO2ASS* (g), sarà data dalla relazione:

$$CO2ASS = SUP * TCO2$$

Dove *TCO2* è il tasso di assorbimento annuo per unità di superficie (g/m<sup>2</sup>).

La Tabella 15 riporta alcuni valori di *TCO2* per diverse tipologie di vegetazione.

TABELLA 15: QUANTITÀ DI ANIDRIDE CARBONICA SOTTRATTA PER UNITÀ DI SUPERFICIE PER ALCUNE OPERE A VERDE.

Tipo di vegetazione	TCO2 (g di CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )	Note	Fonte
<b>copertura estensiva di tetti verdi</b>	594 – 616		(Getter et al. 2009)
<b>alberature</b>	887 – 4102	valori medi per clima temperato umido senza stagione arida	(modificato da Ning et al. 2016)
<b>alberature</b>	1797 – 9245	valori stimati sul numero totale di piante e assegnando una superficie media di 16 m <sup>2</sup>	(modificato da McPherson et al. 2006)
<b>copertura arbustiva ornamentale</b>	440 – 3179	da modello, applicato a verde pensile	(Marchi et al. 2015)
<b>copertura erbacea perenni</b>	946 – 9680	considera la copertura della parte epigea solitamente asportata	(Ondoño et al. 2016)

Per sottrazione indiretta si intende invece la mancata produzione di CO<sub>2</sub> per la riduzione delle esigenze energetiche, *CO2RE*. In questa fase si considererà in particolare il risparmio energetico stimato al paragrafo 4.4 per cui:

$$CO2RE = RCOOLTOT * PRODCO2$$

La produzione di CO<sub>2</sub> per la produzione di energia varia in funzione del metodo e del combustibile impiegato. Nel caso del consumo di energia elettrica per raffrescamento, l'emissione media di CO<sub>2</sub> per l'energia elettrica prodotta in Italia è stimata in 315 g / kWh (rispetto al 2015, Caputo 2017).

Anche la riduzione dei volumi di acque luride da trattare negli impianti di depurazione costituisce di fatto una contrazione delle esigenze energetiche e conseguentemente di produzione di CO<sub>2</sub> ma è cautelativamente corretto considerare tale valore nullo lasciando la sua stima ad un approfondimento successivo.

#### Calcolo del valore della CO<sub>2</sub> sottratta

Il prezzo di una tonnellata di CO<sub>2</sub> venduta nel mercato internazionale, *PCO2* (€/t), si assesta attorno ai 21,77 euro (anno 2019, fonte [www.sendeco2.com](http://www.sendeco2.com)).

Il beneficio dovuto alla riduzione di CO<sub>2</sub> (*BCO2*) si stima come:

$$BCO2 = (CO2ASS + CO2RE) * PCO2$$

#### 4.6 Benefici per il riuso dell'acqua piovana

La valutazione si applica alle opere di raccolta ovvero le cisterne. Il costo si calcola a partire dal volume immagazzinato, *VACC*, per il costo dovuto al consumo di acqua potabile, *CPOT*. Nell'area milanese, il costo per unità di volume di acqua potabile, è in media di 0.55 euro (CAP 2018, riferita alla sola componente eccedente la tariffazione residenziale). Tale valore comprende gli oneri necessari a garantire il servizio di distribuzione dell'acqua potabile e quindi le spese di impianto e energetiche.

La stima dei benefici per il riuso dell'acqua potabile si applica in particolare alle opere che prevedono la possibilità di accumulo e quindi solo alle cisterne:

$$VACC = SUP * EFFT * PCUM = VDEP$$

e il beneficio è quindi pari a:

$$BH2O = VACC * CPOT$$

#### 4.7 Esempio di calcolo

*Si vogliono valutare i costi e i benefici derivanti dall'installazione di su una palazzina di 2 piani di un tetto verde di estensione 100 m<sup>2</sup>, sia di tipo estensivo che intensivo. Si considera una vita media dell'opera di 40 anni. L'opera è localizzata in un'area con precipitazione media annua di 900 mm e un volume specifico di laminazione di 300 m<sup>3</sup>/ha di superficie impermeabile.*

Applicando le relazioni precedentemente descritte, si ottengono i valori riportati in Tabella 16. A fronte di un investimento compreso tra i 6 e 15 mila euro, a cui si aggiungono i costi di manutenzione stimati nel complesso tra i 4 e i 20 mila euro nell'arco della vita utile dell'opera, si ottiene un beneficio complessivo, per il medesimo periodo di riferimento, tra i 22 e i 4 mila euro.

La maggior parte dei benefici deriva da una riduzione dei costi dovuti al raffrescamento degli edifici (in media 82%). Circa il 15% è invece dovuto alla riduzione dei costi relativi alla gestione delle acque meteoriche, sia per la loro raccolta, depurazione e immagazzinamento temporaneo in caso di eventi estremi. Il residuo 3% è invece dovuto ai benefici in termini di riduzione della produzione di anidrite carbonica.

Rispetto a tutti i fattori considerati, il termine di risparmio energetico è quello che consente un beneficio maggiore e diretto, soprattutto per la proprietà dell'immobile direttamente interessata dall'opera a verde e, indirettamente gli edifici vicini. La stima effettuata è di massima e ottenuta da valutazioni generiche che andrebbero approfondite con specifiche analisi dei fabbisogni energetici e della reale propensione all'installazione degli impianti di raffrescamento. Tuttavia, il valore di risparmio ottenuto si assesta tra il 16 e il 33% del consumo medio, in linea con quanto ottenuto da altri ricercatori (Radhi & Sharples 2013) e consente di evidenziare sia il peso della componente energetica a livello dei consumi energetici individuali, sia, a livello territoriale, l'effetto che l'isola di calore ha sui costi di gestione degli immobili.

All'opposto, i benefici dovuti ai mancati costi attribuibili alla gestione e allo smaltimento delle acque meteoriche sono contenuti anche se non tengono conto, nella proiezione temporale, di un aumento dei costi di gestione.

Ancora minori sono quelli da attribuire alla riduzione delle immissioni di CO<sub>2</sub> che in parte possono essere ritenuti sottostimati poiché non comprendono la quota risparmiata per la riduzione dei volumi di acque trattate e il funzionamento di tutto il servizio (realizzazione di tratte, manutenzione, attività di controllo, ecc.).

TABELLA 16: VALUTAZIONE COSTI-BENEFICI PER UN TETTO VERDE DI 100 M<sup>2</sup>.

voce di bilancio	tipo estensivo	tipo intensivo
costo di realizzazione	€ 5,963.00	€ 15,327.00
costo di manutenzione	€ 3,840.00	€ 20,000.00
beneficio per riduzione di volumi acque da trattare	-€ 766.80	-€ 2,044.80
beneficio per riduzione costi opere di drenaggio collettive	-€ 780.00	-€ 2,080.00
beneficio per riduzione volumi di piena	-€ 1,260.00	-€ 3,360.00
beneficio per riduzione produzione CO <sub>2</sub>	-€ 655.19	-€ 1,260.57
beneficio per riduzione consumi energetici	-€ 18,189.60	-€ 36,379.20
beneficio per riuso acqua piovana	€ 0.00	€ 0.00
<b>TOTALI</b>		
<b>COSTI</b>	<b>€ 9,803.00</b>	<b>€ 35,327.00</b>
<b>BENEFICI</b>	<b>-€ 21,651.59</b>	<b>- € 45,124.57</b>
<b>BILANCIO</b>	<b>-€ 11848.59</b>	<b>- € 9,797.57</b>

Isolando la sola componente dei benefici che può giustificare un interesse sul servizio pubblico (effetti sulle acque e produzione di CO<sub>2</sub>), queste nel complesso risultano pari ad un valore compreso tra il 25 e il 35% della spesa sostenuta dalla proprietà dell'immobile.

Il bilancio finale vede quindi un saldo a favore dei benefici compreso tra 10 e 12 mila euro nell'arco dei 40 anni di esercizio. A questo va poi aggiunto, almeno in termini qualitativi, un generale incremento del valore economico dell'immobile, una riduzione diretta e indiretta di altri inquinanti (polveri sottili, composti a base di azoto, fosforo, ecc.) e la possibilità di spazi fruibili, soprattutto nel caso dei tetti verdi intensivi.