

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E DEI MATERIALI

Ciclo XXVII

Settore concorsuale di afferenza: 08/A1

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/02

TETTI VERDI: ANALISI SPERIMENTALE E SIMULAZIONE NUMERICA

SARA SIMONA CIPOLLA

Coordinatore Dottorato:
Prof. Ing. Alberto Lamberti

Relatore:
Prof. Ing. Marco Maglionico

ESAME FINALE ANNO 2015

Abstract

Green roofs (GR) are an increasingly popular method for mitigating the negative environmental impacts of urbanization, however literature still shows a limited knowledge on the behaviour of extensive GR under sub-mediterranean climate. This experimental study is supported by 15 months of field monitoring activity within two large GR located on the engineering laboratories of the University of Bologna, Italy. Firstly native perennial herbs mix (NR) and succulent Sedum mix (SR) plots were compared to each other and with a bare-bituminous membrane control plot (RR) to evaluate their hydrological behaviour and diurnal cooling effects. Both the GR are able to reduce the runoff and the surface temperature, moreover the native mix seems to achieve a better cooling service and a higher retention capacity due to his transpiration physiology which determines greater daily evapotranspiration (ET) losses. Secondly the study investigates how the moisture content in the Sedum green roof varies during dry periods due to ET. Daily moisture loss rates were influenced by temperature, initial moisture content and vegetation growth stages. Subsequently it is demonstrated that the observed moisture content data can be accurately simulated using an hydrologic model based on water balance and two conventional Potential ET models (Hargreaves and Penman-Monteith) combined with a soil moisture function. Specific monthly correction factors have been proposed to account for differences between GR and standard reference crops during the growth stages. Finally, the retention performances of SR and RR plots were simulated continuously (12 months) using the Stormwater Management Model (SWMM) with Low Impact Development (LID) controls module (version 5.1.007). The model, calibrated and validated with the experimental data, shows satisfactory results in terms of annual simulated runoff volume. It can be, after a proper calibration, a valid tool to support engineers and administrators to evaluate the benefits deriving from the use of GR.

Sommario

I tetti verdi rappresentano, sempre più frequentemente, una tecnologia idonea alla mitigazione delle problematiche connesse all'urbanizzazione, tuttavia la conoscenza delle prestazioni dei GR estensivi in clima sub-Mediterraneo è ancora limitata. La presente ricerca è supportata da 15 mesi di analisi sperimentali su due GR situati presso la Scuola di Ingegneria di Bologna. Inizialmente vengono comparate, tra loro e rispetto a una superficie di riferimento (RR), le prestazioni idrologiche ed energetiche dei due GR, caratterizzati da vegetazione a Sedum (SR) e a erbe native perenni (NR). Entrambi riducono i volumi defluiti e le temperature superficiali. Il NR si dimostra migliore del SR sia in campo idrologico che termico, la fisiologia della vegetazione del NR determina l'apertura diurna degli stomi e conseguentemente una maggiore evapotraspirazione (ET). Successivamente si sono studiate le variazioni giornaliere di umidità nel substrato del SR riscontrando che la loro ampiezza è influenzata dalla temperatura, dall'umidità iniziale e dalla fase vegetativa. Queste sono state simulate mediante un modello idrologico basato sull'equazione di bilancio idrico e su due modelli convenzionali per la stima della ET potenziale combinati con una funzione di estrazione dell'umidità dal suolo. Sono stati proposti dei coefficienti di correzione, ottenuti per calibrazione, per considerare le differenze tra la coltura di riferimento e le colture nei GR durante le fasi di crescita. Infine, con l'ausilio di un modello implementato in SWMM 5.1.007 utilizzando il modulo Low Impact Development (LID) durante simulazioni in continuo (12 mesi) si sono valutate le prestazioni in termini di ritenzione dei plot SR e RR. Il modello, calibrato e validato, mostra di essere in grado di riprodurre in modo soddisfacente i volumi defluiti dai due plot. Il modello, a seguito di una dettagliata calibrazione, potrebbe supportare Ingegneri e Amministrazioni nella valutazione dei vantaggi derivanti dall'utilizzo dei GR.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare di cuore il Prof. Marco Maglionico per il sostegno e la fiducia dimostrata durante questi anni. Ringrazio caldamente l'Ing. Irena Stojkov, carissima amica che, con la sua determinazione, ha trainato il progetto "Tetti verdi" al successo. Ringrazio vivamente la Prof.ssa Speranza, La Prof.ssa Bonoli, il Prof. Lamberti, la Dot.ssa Lucia Ferroni e l' Ing. Andrea Conte per il supporto nella realizzazione e manutenzione del campo prove sperimentale e per i consigli durante la stesura della tesi.

Ringrazio inoltre tutti i promotori del progetto ovvero il dipartimento DICAM, il CIRI-U.O. Fluidodinamica e l' ufficio tecnico d'ateneo (AUTC); i partners locali e internazionali del progetto ovvero il dipartimento DIpSA, l'Azienda Agraria di Ateneo (AUB) e la Columbia University; le aziende coinvolte (Harpo Seic verde Pensile e Casalini Co) e tutti coloro che direttamente o indirettamente hanno supportato e reso possibile il progetto e l'attività di ricerca come: il Prof. Mazzotti e l' Ing. Minnai che hanno effettuato i calcoli statici; il Prof. Bittelli del DipSa per le analisi sul substrato, l' Ing. Gottardi per l'utilizzo della termocamera; Il Prof. Semprini e Maurizio Chendi per la calibrazione delle termocoppie; il personale del LIDR (Ing. Massimo Guerrero e Alberto Boninsegni), del LISGR (Gianfranco Maltoni) e del LAGIRN (Prof. Villiam Bortolotti e Barbara Ravaglia) per il supporto costante.

Ringrazio inoltre tutti i colleghi di Costruzioni Idrauliche per l'affetto e la disponibilità dimostratami in questi anni.

Indice

Abstract	iii
Sommario	iv
Ringraziamenti	v
Indice	vi
Elenco delle Figure	ix
Elenco delle Tabelle	xiii
1 Introduzione	1
2 Tetti verdi	5
2.1 Storia dei tetti verdi	5
2.2 Aspetti tecnici	7
3 Caso studio	9
3.1 Descrizione del sito	9
3.1.1 Reference Roof	11
3.1.2 Sedum Roof	12
3.1.3 Native Roof	13
3.2 Struttura della copertura	14
3.2.1 Membrana impermeabilizzante antiradice	14
3.2.2 Feltro di protezione e accumulo	15
3.2.3 Elemento di drenaggio, aerazione e accumulo idrico	15
3.2.4 Telo filtrante	16
3.2.5 Substrato	16
3.2.5.1 Proprietà	16
3.2.5.2 Curva di ritenzione idrica	20
3.2.6 Vegetazione	24
3.2.6.1 Sedum	24
3.2.6.2 Gramineae e Leguminosae	27
3.3 Sistema di monitoraggio	30

3.3.1	Stazione meteorologica	30
3.3.2	Misurazione del runoff	32
3.3.3	Misurazione della temperatura	34
4	Analisi dati sperimentali	37
4.1	Clima e contesto	37
4.2	Analisi dati meteorologici	40
4.2.1	Precipitazioni	40
4.2.2	Temperatura dell'aria	41
4.2.3	Temperatura di rugiada e Umidità relativa	42
4.2.4	Radiazione Solare	43
4.2.5	Vento	44
4.3	Osservazioni idrologiche	47
4.3.1	Revisione della lettura scientifica	47
4.3.2	Metodo	51
4.3.3	Risultati	52
4.3.4	Conclusioni	63
4.4	Osservazioni termiche	64
4.4.1	Revisione della lettura Scientifica	64
4.4.2	Metodo	66
4.4.3	Risultati	70
4.4.4	Conclusioni	75
5	Modellazione numerica dei processi idrologici	79
5.1	Revisione della letteratura scientifica	79
5.2	Richiamo teorico	83
5.3	Modellazione del decadimento dell'umidità del suolo in tempo secco nei tetti verdi	85
5.3.1	Metodi	89
5.3.2	Risultati	94
5.3.3	Conclusioni	100
5.4	Modellazione in continuo dei processi idrologici attraverso il codice di calcolo EPA SWMM	102
5.4.1	Implementazione del modello	102
5.4.2	Risultati e discussione	105
5.4.2.1	Calibrazione e Validazione	105
5.4.2.2	Risultati	110
5.4.3	Conclusioni	112
6	Conclusioni	115
	Bibliografia	119

Elenco delle figure

2.1	Tetti verdi storici presso la città di Amburgo.	6
2.2	“Bosco verticale”, vincitore dell’ <i>International Highrise Award nel 2014</i>	6
3.1	Sede del Lazzaretto della Scuola di Ingegneria	10
3.2	Edifici costituenti il Laboratorio LAGIRN	11
3.3	Vista 3D del sito sperimentale.	11
3.4	Sito monitorato: Reference e Sedum roof	12
3.5	Sito monitorato: Native roof	13
3.6	Schematizzazione della copertura verde utilizzata	14
3.7	Membrana impermeabilizzante sintetica antiradice	15
3.8	Elementi costituenti il pacchetto Seic verde pensile. Dal basso verso l’alto la membrana HarpoPlan ZD UV in nero, il feltro Seic-MediPro MP 300 in bordeaux, l’elemento di accumulo e aerazione Seic-MediDrain MD 25 in nero ed il telo filtrante MediFilter MF 1 in grigio	15
3.9	Curva granulometrica Campione A	18
3.10	Curva granulometrica Campione B	18
3.11	Confronto tra le curve granulometriche dei due campioni	19
3.12	Volume di substrato prelevato dal Sedum Roof	21
3.13	Curva di ritenzione e Curva di conducibilità idrica ottenute mediante ottimizzazione non lineare dei parametri della funzione di VanGenuchten (Van Genuchten, 1980).	23
3.14	Varietà di <i>Sedum</i> contenute nel mix	25
3.15	Fase di piantumazione per talee del SR	26
3.16	Fasi di accrescimento delle talee di Sedum	26
3.17	Evoluzione temporale della coltura Sedum nel SR plot	27
3.18	Mix di vegetazione provenienti da praterie semiaride, “mesombreti” ed impiantata nel plot NR	28
3.19	Fase di piantumazione del tetto NR	29
3.20	Stazione meteo Onset Hobo U30 (Hobo)	31
3.21	Sonda capacitiva ECH_2O (Decagon) per la misurazione dell’umidità del suolo)	31
3.22	Misuratori di portata: fase di calibrazione e installazione.	33
3.23	Area di pertinenza misuratori di portata.	34
3.24	Fotografie e corrispettive immagini termografiche del tetto verde sperimentale in data 27/09/2014	35
3.25	Termocoppie installate nei diversi plots per la determinazione dei profili verticali di temperatura	35

4.1	Dati storici di temperatura dall'anno 1991 al 2013 (Servizio IdroMeteo-Clima dell'ARPA)	38
4.2	Precipitazioni annuali per la città di Bologna dal 1935 al 2013	38
4.3	Boxplot mensili delle precipitazioni della città di Bologna dal 1935 al 2013	39
4.4	Precipitazione	40
4.5	Cumulata di pioggia registrata nel 2014 dalla stazione Onset Hobo U30 (Hobo) e confronto tra i valori medi mensili di precipitazione per Bologna e i dati misurati nel 2014 dalla stazione meteo Hobo.	41
4.6	Temperatura dell'aria 2013-2015	42
4.7	Temperatura di rugiada 2013-2015	43
4.8	Umidità relativa 2013-2015	44
4.9	Radiazione solare 2013-2015	44
4.10	Rosa dei venti registrati dalla stazione Hobo nel 2014	45
4.11	Andamento stagionale dei venti: a) inverno, b) primavera, c) estate, d) autunno.	46
4.12	Frequenze cumulate delle altezze di precipitazione degli eventi analizzati: in nero per il plot SR ed in grigio per il plot NR	53
4.13	Boxplot rappresentanti la variabilità stagionale delle altezze di pioggia degli eventi misurati per i plot SR e NR	54
4.14	Regressioni tra afflussi e deflusso nel plot SR e NR.	54
4.15	Plot di regressione di alcuni parametri chiave del processo afflussi/deflussi	55
4.16	Data set sperimentale plot SR (punti) e modello proposto da Yang et al. (2015)(linea rossa)	58
4.17	Regressione lineare tra la precipitazione P [mm] e il parametro $R + (\theta_e - \theta_i) * Z$	59
4.18	Regressione lineare tra precipitazione e ritenzione per gli eventi comuni al plot SR e al plot NR.	60
4.19	Confronto durante ogni evento considerato tra la ritenzione del NR e del SR. I punti neri corrispondono al periodo non irriguo mentre quelli rossi al periodo irriguo. La linea verde tratteggiata individua una condizione di ritenzione uguale.	62
4.20	Fotografie e corrispondenti immagini termografiche del tetto verde sperimentale in data 27/09/2014	67
4.21	Particolari del Sedum e del Bromus durante le acquisizioni termografiche.	68
4.22	Posizionamento planimetrico delle termocoppie	68
4.23	Posizionamento termocoppie sui plot monitorati	69
4.24	Variazione media oraria durante i mesi di settembre e ottobre della temperatura della superficie a sedum (verde), a bromus e leguminose (Rosso), dell'aria (blue) e del tetto nero di rigerimento (nero). La linea tratteggiata grigia rappresenta la radiazione solare.	71
4.25	Variazione media oraria durante i mesi di novembre e gennaio della temperatura della superficie a sedum (verde), a bromus e leguminose (Rosso), dell'aria (blue) e del tetto nero di rigerimento (nero). La linea tratteggiata grigia rappresenta la radiazione solare.	73
4.26	Profili verticali diurni di temperatura nel tetto di riferimento e nel tetto vegetato a sedum (10/10/2014)	76

5.1	DWPs(Giugno-Agosto) analizzati e relativi parametri meteo	90
5.2	DWPs (Settembre-Gennaio)analizzati e relativi parametri meteo	91
5.3	Dettaglio del Sedum in inverno e in estate	92
5.4	Perdita diurna per Evapotraspirazione nei DWPs selezionati e parametri climatici medi giornalieri osservati.	93
5.5	Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP1, DWP2 e DWP3.	95
5.6	Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP3, DWP4 e DWP5.	96
5.7	Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP1, DWP2 e DWP3.	97
5.8	Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP3, DWP4 e DWP5.	98
5.9	Area di pertinenza misuratori di portata.	103
5.10	letogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati ed i deflussi misurati in fase di calibrazione per il modello del Reference Roof.	107
5.11	letogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati ed i deflussi misurati degli eventi utilizzati in fase di validazione per il modello del Reference Roof.	107
5.12	letogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati ed i deflussi misurati degli eventi utilizzati in fase di calibrazione per il modello del Sedum Roof.	108
5.13	letogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati ed i deflussi misurati degli eventi utilizzati in fase di validazione per il modello del Sedum Roof.	109
5.14	letogramma di precipitazione reale e comparazione tra i volumi simulati defluiti dal modello del RR ed i volumi simulati defluiti dal modello del SR.	111

Elenco delle tabelle

2.1	Classificazione dei tetti verdi e loro principali caratteristiche (Berardi et al., 2014).	7
3.1	Caratteristiche principali del <i>Reference Roof</i> .	12
3.2	Caratteristiche principali del <i>Sedum Roof</i> .	12
3.3	Caratteristiche principali del <i>Native Roof</i> .	13
3.4	Curva granulometrica campione A	17
3.5	Curva granulometrica campione B	18
3.6	Proprietà base substrato	20
3.7	Gestione dell'irrigazione del NR plot	30
3.8	Aree di pertinenza dei misuratori di portata	32
3.9	Equazione di calibrazione delle termocoppie	36
4.1	Sommario degli studi inerenti le prestazioni idrologiche di tetti verdi in scala reale.	49
4.2	Caratteristiche riassuntive eventi validi per il plot SR ed NR	55
4.3	Caratteristiche riassuntive degli eventi con misura contemporanea di precipitazione, deflusso e umidità per il plot SR	58
4.4	Caratteristiche riassuntive eventi comuni al SR e al NR	61
4.5	Gestione dell'irrigazione del NR plot	61
4.6	Posizione dei sensori di temperatura durante il monitoraggio 2014-2015	69
5.1	Serie di DWPs disponibili	89
5.2	Serie di DWPs analizzate	91
5.3	Analisi statistica quantitativa dei modelli idrologici utilizzati	99
5.4	Coefficienti di calibrazione colturali K_c	100
5.5	Parametri utilizzati per la simulazione del Reference Roof	104
5.6	Parametri della "Bio-retention Cells" e della "Permeable pavement" utilizzati nella LID-SWMM per simulare il plot SR	105
5.7	Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) e Observation Standard deviation Ratio (RSR) per gli eventi utilizzati in fase di calibrazione validazione.	107
5.8	Differenza percentuale relativa (RPDs) tra il volume defluito e il picco di portata tra gli eventi monitorati e simulati durante la fase di calibrazione e validazione.	108

*Alla mia famiglia ed al mio ragazzo per essermi sempre accanto
trasmettendomi grinta, tenacia e tanto amore.*

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, per la prima volta nella storia, la popolazione urbana ha pareggiato quella rurale. Attualmente il 50% della popolazione mondiale vive in aree urbane e si prevede che entro la metà del secolo si possa giungere ad oltre i due terzi. Questo rapido e intenso processo di urbanizzazione determina importanti sfide tecnologiche e sociali volte alla risoluzione di problemi quali l'impermeabilizzazione del suolo, l'aumento dell'inquinamento, la riduzione della biodiversità, l'aumento delle temperature urbane e la riduzione delle aree verdi. La ricerca e i produttori di tecnologia devono individuare rapidamente i mezzi e le strategie con cui limitare tali effetti negativi; la loro attività deve essere coadiuvata da politiche nazionali ed internazionali capaci di sensibilizzare la popolazione stimolandola ad essere la protagonista del cambiamento. L'obiettivo di tecnici e pianificatori deve essere quello di fornire strumenti tecnologici che consentano la riduzione dell'impatto antropico sui sistemi naturali in modo tale da tutelare gli ecosistemi naturali. Poichè è utopistico pensare di ostacolare l'espansione urbana si deve cercare di renderla sostenibile in modo tale da salvaguardare l'ambiente per le generazioni future.

L'urbanizzazione determina principalmente la nascita di nuovi edifici ed un incremento della loro densità. Per riuscire a garantire uno sviluppo sostenibile delle città occorre quindi: (a) agire direttamente sulle tecnologie presenti negli edifici in modo tale da ridurre il loro consumo energetico e l'impatto sul bilancio idrologico urbano; (b) fare in modo che gli edifici siano parte integrante di un sistema diffuso di produzione energetica o siano in grado di auto-sostenersi e (c) assicurarsi che riescano a garantire un'area verde circa pari a quella di cui hanno preso il posto. In questo contesto i "tetti verdi" vengono spesso identificati come una valida soluzione per rendere gli edifici e le aree urbane più sostenibili ([Berardi et al., 2014](#); [Blank et al., 2013](#); [Castleton et al., 2010](#); [Cook-Patton and Bauerle, 2012](#); [GhaffarianHoseini et al., 2013](#)).

Un tetto verde (green roof), noto anche come "living roof" o "eco-roof" è essenzialmente

una struttura multistrato composta da almeno 4 elementi: la membrana impermeabilizzante, il drenaggio, il substrato e la vegetazione (Castleton et al., 2010). I tetti verdi, inizialmente pensati per migliorare l'isolamento termico e l'estetica degli edifici, nel corso degli ultimi 10 anni, sono stati oggetto di numerose ricerche che ne hanno dimostrato i vantaggi nell'ambito della regimazione delle acque meteoriche (Berndtsson, 2010; Stovin et al., 2012), della riduzione del consumo energetico degli edifici (Castleton et al., 2010), della riduzione dell'effetto isola di calore (Santamouris, 2014), della mitigazione dell'inquinamento atmosferico (Yang et al., 2008) e sonoro (Connelly and Hodgson, 2008; Van Renterghem and Botteldooren, 2009; Van Renterghem et al., 2013) ed infine della preservazione degli ecosistemi (Oberndorfer et al., 2007) e della tutela della biodiversità (Cook-Patton and Bauerle, 2012; Ranalli and Lundholm, 2008). I "tetti verdi" rappresentano quindi un argomento di ricerca estremamente multidisciplinare che, a causa della presenza della vegetazione, viene fortemente influenzato anche dalle condizioni climatiche in cui si opera.

Negli ultimi anni i numerosi benefici derivanti dall'utilizzo dei tetti verdi hanno determinato, la loro inclusione sia nell'elenco degli interventi consigliati per accrescere la sostenibilità di un edificio e quindi il punteggio in fase di certificazione ambientale (Feng and Hewage, 2014) che nell'elenco dei sistemi che garantiscono la laminazione e l'attenuazione delle portate di origine meteorica in ambito urbano (Palla et al., 2010a; Stovin et al., 2012). Con il termine SuDS (Sustainable urban Drainage Systems) o LID (Low Impact Developments) vengono generalmente indicate tutte quelle tecnologie volte alla riduzione delle portate e dei volumi delle acque meteoriche che giungono nei sistemi fognari a seguito di un evento pluviometrico. La filosofia sulla quale si basa il drenaggio urbano sostenibile è che i moderni approcci per la gestione delle acque meteoriche devono essere in grado di controllare la quantità dei deflussi ed al contempo devono limitare il deterioramento qualitativo delle acque garantendo l'amenità dell'intervento (Stovin et al., 2012). I tetti verdi riescono a soddisfare contemporaneamente questi 3 obiettivi e per questo motivo rappresentano un'opportunità per gli ingegneri di lavorare in armonia con i naturali processi ambientali e di contribuire alla creazione di un ambiente urbano sostenibile.

La presente tesi di dottorato si inserisce all'interno di questo contesto con lo scopo di migliorare la comprensione del funzionamento dei tetti verdi sia in ambito idrologico che termico. L'attività di ricerca è parte integrante del progetto "**Tetti verdi**" all'Università di Bologna proposto dalla Scuola di Ingegneria e Architettura, dal CIRI U.O. Fluidodinamica (Centri interdipartimentali di ricerca industriale) e dall' AUTC (Servizio tecnico di ateneo) con la partecipazione della Scuola di Agraria, dell' Azienda Agraria di Ateneo (AUB), delle aziende Harpo-Seic e Casalini&Co, e del gruppo "Green roof" della Columbia University. Il progetto ha previsto la progettazione, la realizzazione ed il monitoraggio idrologico e termico di un tetto verde di circa 200 m² situato presso la

copertura piana del Laboratorio LAGIRN della sede di via del Lazzaretto della Scuola di Ingegneria che costituisce uno dei pochi tetti verdi estensivi strumentati in scala reale presenti in area mediterranea.

L'attività di ricerca di tesi, che trova le sue basi in 15 mesi di osservazioni sperimentali, si pone gli obiettivi di individuare, attraverso l'analisi dei dati di monitoraggio, i meccanismi che maggiormente influenzano le prestazioni idrologiche e termiche di un tetto verde, di sviluppare un modello numerico per la stima dell'evapotraspirazione reale giornaliera che tenga conto delle condizioni climatiche e del contenuto di umidità del substrato, ed infine, di implementare un modello per la simulazione in continuo dei tetti verdi mediante l'utilizzo del modulo LID del software SWMM. Entrambi i modelli sono stati calibrati e validati utilizzando i dati sperimentali derivanti dal campo prove.

L'analisi dei dati sperimentali e la modellazione numerica sono state affrontate in differenti capitoli, in ciascuno dei quali si è optato per: fornire una dettagliata revisione della letteratura scientifica inerente i temi affrontati; illustrare gli obiettivi ed i metodi utilizzati nella ricerca; descrivere i risultati ottenuti e trarre le relative conclusioni.

Capitolo 2

Tetti verdi

2.1 Storia dei tetti verdi

Le coperture a verde pensile sono state utilizzate per secoli in diverse parti del mondo. I Giardini di Babilonia, costruiti nel 600 a.C., rappresentano la prima testimonianza di giardini pensili. Le prime testimonianze di verde pensile in Italia risalgono al periodo degli etruschi i quali erano soliti ricoprire i propri monumenti funerari con tumuli di terra, inverditi sia con cespugli che con alberi. L'usanza di rendere verde la superficie dei tumuli funerari proseguì fino ai tempi dei Romani, ne sono un esempio le strutture originali del mausoleo di Augusto e di Adriano. I tetti verdi si diffusero anche in altri paesi europei, in particolare in Norvegia in cui venivano utilizzati per migliorare l'isolamento termico degli edifici (Berardi et al., 2014). Questa tecnologia fu trascurata durante il Medioevo ma riemerse alla fine del 1800 grazie al famoso architetto svizzero Le Corbusier che li considerò come uno dei "cinque punti dell'architettura", evidenziandone i loro aspetti tecnologici (isolamento termico della struttura) e ambientali (restituzione della superficie occupata al verde). Nel 1900 i tetti verdi si diffusero rapidamente in Germania dell'Ovest, inizialmente per nascondere le abitazioni dai raid aerei (Fig. 2.1) della seconda guerra mondiale e successivamente al fine di ridurre le perdite energetiche degli edifici. In questo contesto nacque la "F.L.L.", Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (Associazione di ricerca dei costruttori del paesaggio) il cui scopo primario è il recupero ed il miglioramento dell'ambiente abitativo. Quest'associazione riuscì a far varare una legge di tutela ambientale che rese obbligatoria la realizzazione di aree verdi nei cortili e sulle coperture piane degli edifici (Pittaluga et al., 2009). La F.L.L. ha redatto un importante manuale di direttive per la progettazione, manutenzione e realizzazione dei tetti verdi. Sul finire del secolo scorso i tetti verdi si sono rapidamente diffusi sia nell'Europa centrale che in Nord America ed in



FIGURA 2.1: Tetti verdi storici presso la città di Amburgo.

particolare nelle adiacenze di Portland. Recentemente il Giappone ha emanato delle direttive in cui i tetti verdi vengono individuati quali principali tecnologie per la mitigazione dell'effetto isola di calore ([Berardi et al., 2014](#)).

In Italia la regolamentazione della progettazione e costruzione dei tetti verdi è affidata alla normativa UNI 11235:2007 che tuttavia si concentra prevalentemente sulle caratteristiche dei singoli elementi o strati, fornendo poche e fugaci indicazioni sulle prestazioni dei sistemi e sugli aspetti botanici. A supporto del progettista, al fine di colmare questa lacuna, nel 2012 l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) ha emanato delle linee guida per la progettazione del verde pensile ([Andri and Sauli, 2012](#)).

La recente attenzione nei confronti dei tetti verdi è dimostrata dall'elevato numero di conferenze, associazioni e competizioni internazionali sul tema. In Fig. 2.2 viene mostrato il famoso grattacielo "Bosco Verticale" realizzato a Milano dallo studio Boeri e vincitore dell'*International Highrise Award 2014*, competizione internazionale a cadenza biennale per l'assegnazione del premio di grattacielo più bello del mondo.

FIGURA 2.2: "Bosco verticale", vincitore dell'*International Highrise Award* nel 2014.

2.2 Aspetti tecnici

I tetti verdi sono delle strutture composte da differenti strati sovrapposti sulla cui sommità viene fatta crescere la copertura vegetale. Gli elementi principali dal basso verso l'alto sono: (a) la membrana bituminosa impermeabilizzante, (b) il drenaggio, (c) il filtro, (d) il substrato e (e) le piante. Spesso la configurazione base viene arricchita mediante l'utilizzo di layers aggiuntivi come ad esempio il "root barrier" (che serve per proteggere la membrana bituminosa dalle radici), il sistema irriguo (sotto o sopra il substrato), e i filtri supplementari (Castleton et al., 2010; Palla et al., 2009). I tetti verdi possono essere costituiti da sistemi di tipo modulare, pre-coltivati o costruiti in opera e possono interessare tutta la superficie del tetto o solo una parte.

Le coperture a verde pensile sono usualmente classificate in *intensive* ed *estensive*. Le realizzazioni di tipo intensivo includono veri e propri giardini pensili, con spessori del substrato che possono raggiungere i 200 mm in cui crescono erbe, cespugli ed alberi. I tetti verdi di tipo estensivo sono generalmente caratterizzati da un sistema più semplice, lo spessore del substrato difficilmente supera i 20 cm, possono essere applicati anche su edifici esistenti e difficilmente sono accessibili. Attualmente la distinzione tra intensivo ed estensivo non è univoca, la tabella 2.1, tratta da Berardi et al. (2014), riporta le principali caratteristiche dei due tipi di configurazione.

Main attributes	Extensive	Intensive
Thickness of substrate	Below 200mm	Above 200 mm
Accessibility	Inaccessible (fragile roots)	Accessible (usable for recreation purpose)
Weight	60–150 kg/m ²	Above 300 kg/m ²
Diversity of plants	Low (moss, herb and grass)	High (lawn or perennials, shrub and tree)
Construction	Moderately easy	Technically complex
Irrigation	Often not necessary	Necessity of drainage and irrigation systems
Maintenance	Simple	Complicated
Costs	Low	High

TABELLA 2.1: Classificazione dei tetti verdi e loro principali caratteristiche (Berardi et al., 2014).

Una corretta progettazione delle coperture verdi presuppone un'opportuna scelta delle essenze vegetali. Quest'ultima richiede sia un esame attento delle condizioni ambientali e microclimatiche, sia la conoscenza agronomica e fisiologica della vegetazione. Il Sedum è la famiglia di piante maggiormente utilizzate nei tetti verdi in particolare in quelli di tipo estensivo. La crescita lenta in altezza, le abitudini d'accrescimento in orizzontale, l'elevata tolleranza alla siccità ed in particolare i bassi costi di manutenzione rendono questa specie la candidata ideale per i tetti verdi. Tuttavia questa specie ha mostrato, in particolare in climi caldi ed in condizioni di stress idrico, di attivare la fotosintesi di tipo CAM (Crassulacae Acid Metabolism) a causa della quale si ha la chiusura diurna degli stomi. La conseguenza principale di questo comportamento è il

fatto che il Sedum non sia in grado di evitare il trasferimento di calore convettivo sotto le foglie e, di conseguenza, mostra un basso valore di resistenza termica ([Emilsson, 2008](#); [Jim, 2014b](#)). Negli ultimi anni sono state effettuate diverse ricerche che mirano sia all'introduzione di specie native in sostituzione al Sedum ([Blanusa et al., 2013](#)) per aumentare il valore ecologico dell'intervento che specie vegetali in grado di produrre ortaggi ([Galarza-Molina et al., 2014](#); [Whittinghill et al., 2014](#)). La FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) attraverso il progetto "Green food from green roofs" promuove in diversi paesi in via di sviluppo la costruzione di tetti verdi per combattere la povertà nei centri di città densamente popolate.

Capitolo 3

Caso studio

Il capitolo illustra le caratteristiche del tetto verde sperimentale situato presso la Scuola di Ingegneria sulla sommità del laboratorio LAGIRN. Nel presente capitolo verranno inoltre definiti gli strumenti di monitoraggio e le procedure di prova.

3.1 Descrizione del sito

La Scuola di Ingegneria dell'Università di Bologna è suddivisa in due plessi, il primo noto anche con l'appellativo di Sede Storica si trova nella zona centrale della città di Bologna mentre il secondo di più recente costruzione, si trova nella periferia nord della città, in via del Lazzaretto. Il plesso del Lazzaretto (Fig. 3.1), inaugurato nel 2007 è un'area relativamente nuova e moderna che ospita edifici atti alla didattica, alla ricerca ed i laboratori. È proprio in questo plesso che, nel 2012, grazie ad un'iniziativa del Dipartimento DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali), del CIRI (Centro interdipartimentale ricerca industriale)- U.O. Fluidodinamica, dall'AUTC (Servizio tecnico di ateneo) del Dipartimento e il DlpSA (Dipartimento di Scienze Agrarie) e dell'Azienda Agraria dell'Università di Bologna (AUB) nasce il **Progetto tetti verdi** dell'Università di Bologna (Bonoli et al., 2013).

Il progetto di ricerca ha previsto la realizzazione di un tetto verde in scala reale in corrispondenza della copertura del Laboratorio LAGIRN (Laboratorio di GeoIngegneria e Risorse Naturali) e la predisposizione di un secondo tetto presso il Laboratorio LIDR (Laboratorio di Idraulica). Il tetto verde in scala reale oggetto del presente studio è quello collocato in corrispondenza del laboratorio LAGIRN (44.513058°N, 11.318787°E). La scelta delle dimensioni del campo prove e della tipologia di copertura vegetale da installare è stata il frutto di uno studio che ha tenuto conto delle capacità portanti residue della struttura, dell'esposizione solare, della geometria e della presenza dei pannelli



FIGURA 3.1: Sede del Lazzaretto della Scuola di Ingegneria. L'area in basso a sinistra evidenziata in rosso corrisponde al tetto verde sperimentale

solari. Il laboratorio LAGIRN (Fig. 3.2) è costituito da 3 edifici (corpo 5, 7 ed 8) realizzati mediante le medesime tecniche: strutture prefabbricate in calcestruzzo armato con coperture in tegoloni prefabbricati in c.a. con sezione a π . Il progetto *Tetti verdi* ha interessato gli edifici 5 e 8 (Fig. 3.2) per un totale di circa $200 m^2$ organizzati in 3 parcelle distinte ed indipendenti che prendono il nome di Reference Roof (RR), Sedum Roof (SR) e Native Roof (NR) (Fig. 3.3). Il tetto sperimentale occupa una superficie quasi orizzontale di circa $200 m^2$ organizzati in 3 parcelle distinte ed indipendenti che prendono il nome di Reference Roof (RR), Sedum Roof (SR) e Native Roof (NR) (3.3). Il cantiere per la costruzione del tetto verde iniziò nel Giugno 2013 e terminò a metà Luglio 2013. A partire dal mese di Agosto dello stesso anno iniziò una completa campagna di monitoraggio che è tutt'ora in atto.

Il corpo 8 è caratterizzato da una superficie di copertura quasi orizzontale di circa $114 m^2$ aventi come recapito delle acque di pioggia due pluviali collocati rispettivamente nello spigolo sud-est e sud- ovest. La regolarità della superficie e la simmetria degli scarichi hanno determinato la suddivisione di questo corpo in due parcelle speculari di uguale superficie (Fig. 3.3) corrispondenti ad un tetto di riferimento (RR) ed ad un tetto verde di tipo commerciale (SR).

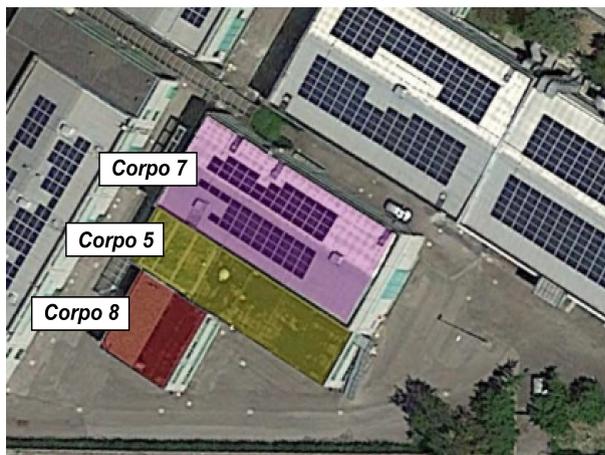


FIGURA 3.2: Edifici costituenti il Laboratorio LAGIRN

La copertura superficiale del corpo 5 è di circa 230 m^2 , di cui circa un terzo è stato destinato alla realizzazione del tetto verde NR (Fig. 3.3) che, a sua volta, è stato suddiviso in 3 sottoparcelle. In ciascuna di esse sono state installate delle versioni modificate del pacchetto commerciale installato nel SR.

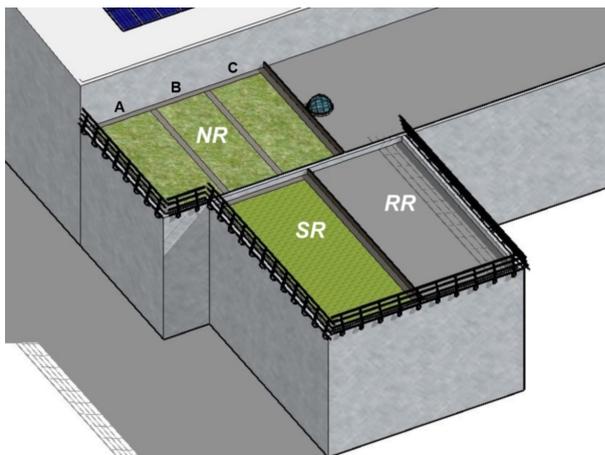


FIGURA 3.3: Vista 3D del sito sperimentale.

3.1.1 Reference Roof

Il Reference Roof (Fig: 3.4), le cui principali caratteristiche sono riassunte in tabella 3.1, occupa una superficie di circa 57 m^2 con una pendenza costante dello 0,5% da nord-ovest verso sud-est nel quale, in corrispondenza dello spigolo, è collocato il pluviale. La superficie è stata ricoperta con una membrana nera in PVC dello spessore nominale di 2.0 mm particolarmente idonea a svolgere la funzione d'impermeabilizzazione in coperture piane accessibili.

Reference Roof	
Superficie	57 m ²
Perimetro	32.5 m
Pendenza	0.5 %
Copertura	Guaina bituminosa
Area verde	-
Vegetazione	-
Irrigazione	-

TABELLA 3.1: Caratteristiche principali del *Reference Roof*.

FIGURA 3.4: Corpo 8; sul lato sinistro dell'immagine (contornato in rosso) il tetto di riferimento (RR), sul lato destro della figura (contorno verde) il tetto verde di tipo commerciale (SR)

Sedum Roof	
Superficie	57 m ²
Perimetro	32.5 m
Pendenza	0.5 %
Copertura	Sistema Seic mediterranean green roof
Area verde	47m ²
Vegetazione	Mix di Sedum
Spessore substrato	10 cm
Irrigazione	a pioggia

TABELLA 3.2: Caratteristiche principali del *Sedum Roof*.

3.1.2 Sedum Roof

Il Sedum Roof (Fig. 3.4), le cui principali caratteristiche sono riassunte nella tabella 3.2, ospita il pacchetto *Verde pensile estensivo-Sistema Seic mediterranean green roof* commercializzato dalla SEIC Verde Pensile- Harpo Spa. Tale pacchetto, i cui elementi costitutivi verranno successivamente descritti, è essenzialmente costituito da una membrana antiradice, da un feltro di protezione, da un elemento di drenaggio/accumulo/aerazione, da un filtro di protezione, da 10 cm di substrato e da uno strato di vegetazione (mix di specie del genere *Sedum* fornite sotto forma di talee).

Native Roof	
Superficie	72 m ²
Perimetro	34.8 m
Pendenza	0.5 %
Copertura	Sistema Seic mediterranean green roof modificato
Area verde	3*19 m ²
Vegetazione	Mix di specie selvatiche locali
Irrigazione	a pioggia
Spessore substrato	8\10\12 cm

TABELLA 3.3: Caratteristiche principali del *Native Roof*.

3.1.3 Native Roof

La copertura superficiale del corpo 5 è di circa 230 m², di cui una porzione di circa 72 m² è stata destinata alla realizzazione del tetto verde NR (Fig. 3.5). Quest'ultima parcella a sua volta, è stata suddivisa in 3 aree verdi di circa 19 m² in ciascuna delle quali sono state installate delle versioni modificate del pacchetto *Verde pensile estensivo-Sistema Seic Mediterranean green roof*. Le principali modifiche apportate al pacchetto tradizionale sono rappresentate dalla tipologia di copertura vegetale utilizzata e dallo spessore del substrato. Il Dipartimento DipSa ha infatti utilizzato questa porzione di tetto per indagare il comportamento di una copertura costituita da un mix di graminacee e leguminose provenienti da popolazioni selvatiche locali. Le tre parcelle evidenziate in figura 3.5 possiedono spessori crescenti del substrato. La parcella di sinistra (evidenziata in blu) e quella di destra (evidenziata in rosa) sono caratterizzate rispettivamente da uno spessore del substrato pari a 8 cm e 12 cm. La parcella centrale invece, è caratterizzata da uno spessore di substrato di 10 cm, pari a quello utilizzato nel Sedum Roof. La tabella 3.3 riassume le principali caratteristiche del native roof.

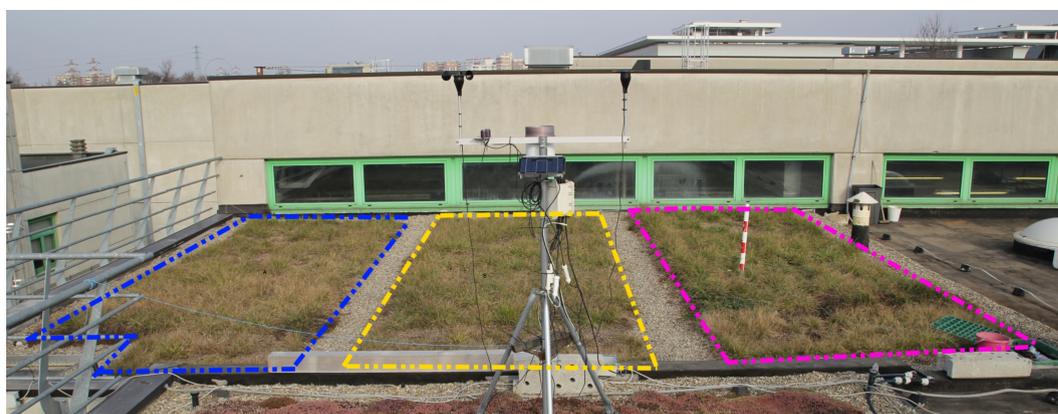


FIGURA 3.5: Native roof. Da sinistra verso destra è possibile osservare il pacchetto con spessore del substrato pari a 8 cm, 10 cm e 12 cm.

3.2 Struttura della copertura

Le coperture a verde pensile utilizzate presso il sito sperimentale sono delle componenti standard installate in una configurazione di tipo estensivo. Partendo dal basso verso l'alto gli elementi che costituiscono il pacchetto sono:

- Membrana impermeabilizzante sintetica antiradice HarpoPlan ZD UV;
- Feltro di protezione e accumulo Seic-MediPro MP 300;
- Elemento di drenaggio aerazione e accumulo idrico MediDrain MD 25;
- Telo filtrante MediFilter MF 1
- Substrato SEIC per inverdimenti estensivi
- Vegeazione estensivo a sedum o specie selvatiche locali.

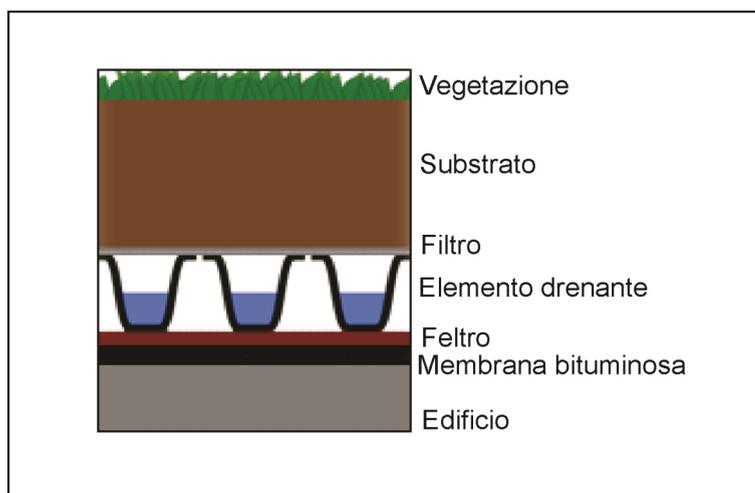


FIGURA 3.6: Schematizzazione della copertura verde utilizzata.

3.2.1 Membrana impermeabilizzante antiradice HarpoPlan ZD UV

La membrana impermeabilizzante sintetica antiradice HarpoPlan ZD UV è una membrana in PVC dello spessore nominale di 2 mm rinforzata con fibra di vetro. La resistenza ai microrganismi e alle radici secondo la norma EN 13948, e la resistenza ai raggi UV, sono alcune delle principali proprietà. La membrana, fornita in rotoli e saldata ad aria calda, è stata posata a Giugno del 2013 su tutta la superficie interessata dal progetto sperimentale. La Fig. 3.7 mostra il Native Roof durante le fasi di installazione di questo strato.



FIGURA 3.7: Membrana impermeabilizzante sintetica antiradice HarpoPlan ZD UV

3.2.2 Feltro di protezione e accumulo Seic-MediPro MP 300

Il feltro di protezione (Fig. 3.8), è costituito da fibre di polipropilene con funzione di protezione meccanica e accumulo idrico. È stato posato sulla guaina (Fig. 3.7) cercando di garantire delle sovrapposizioni di almeno 10 *cm* tra un foglio e il successivo. Il feltro viene ripiegato lateralmente su una griglia metallica contenitiva che ha la funzione di garantire una maggiore protezione della guaina. Il feltro, prodotto con materiali riciclati e immarcescibile, non deve essere esposto direttamente ai raggi UV per non perdere la sua funzionalità.

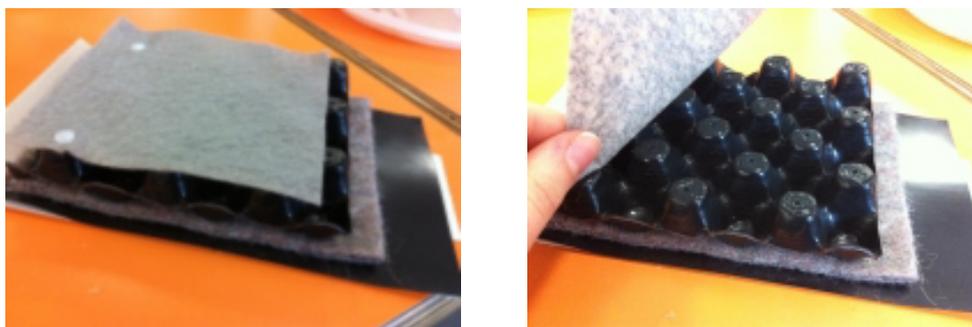


FIGURA 3.8: Elementi costituenti il pacchetto Seic verde pensile. Dal basso verso l'alto la membrana HarpoPlan ZD UV in nero, il feltro Seic-MediPro MP 300 in bordeaux, l'elemento di accumulo e aerazione Seic-MediDrain MD 25 in nero ed il telo filtrante MediFilter MF 1 in grigio

3.2.3 Elemento di drenaggio, aerazione e accumulo idrico Seic-MediDrain MD 25

La funzione primaria dell'elemento di drenaggio è quella di rimuovere rapidamente l'eccesso di acqua dal tetto; a questa funzione primaria usualmente si aggiungono funzioni secondarie quali ad esempio la funzione di accumulo idrico e di aerazione del substrato. L'elemento di drenaggio MediDrain MD 25 (Fig. 3.8), è una sottile lamina in polistirene modellato per termofusione come un elemento tridimensionale contenente delle piccole

coppette, che fungono da elementi di accumulo, e dei canali (l'aspetto del MediDrain MD 25 è molto simile ai contenitori in plastica per le uova). Questa particolare geometria è stata studiata in modo da garantire: un ampio sistema di canali di drenaggio sulla faccia inferiore e fori per la diffusione della pressione di vapore e aerazione, un accumulo idrico di proporzionale alla grandezza degli elementi e una buona resistenza al calpestamento. Il materiale inoltre è praticamente impermeabile, l'acqua lo può dunque attraversare solamente attraverso i fori di aerazione o attraverso i giunti di sovrapposizione tra un foglio ed il successivo. Fatte queste premesse, si può quindi affermare che il deflusso dell'acqua verso i pluviali avviene parallelamente al piano di posa con velocità variabili in funzione del carico idraulico.

La dimensione degli incavi dell'elemento di drenaggio utilizzata nel tetto verde sperimentale è quella che garantisce un volume di accumulo idrico di circa 3 l/m^2 e un volume di riempimento di circa 10 l/m^2 in $2,5 \text{ cm}$ di spessore.

3.2.4 Telo filtrante MediFilter MF 1

La funzione principale del telo filtrante (Fig. 3.8) è quella di impedire l'occlusione dell'elemento di drenaggio da parte del substrato o delle radici. Il telo filtrante MediFilter MF 1 è costituito da un sottilissimo strato (0.47 mm) di geotessile grigio in fibra di polipropilene a filo continuo termosaldato di colore grigio.

3.2.5 Substrato Seic

Il substrato rappresenta il mezzo poroso nel quale si ha l'accrescimento dell'apparato radicale delle piante. Il substrato inoltre, è il materiale che influenza maggiormente i fenomeni idrologici caratteristici dei tetti verdi. Esso è costituito da una miscela di sostanze minerali quali pomice, lapillo vulcanico e zeolite (in percentuali variabili) e di sostanze organiche quali torba e residui vegetali compostabili. La percentuale di sostanza organica è inferiore al 2-4% per evitare che col tempo, a causa dei fenomeni di decomposizione, si abbiano cali di spessore. Il PH è pari circa a 7 mentre la capacità di scambio cationico è circa 20 meq/100 .

3.2.5.1 Proprietà

La conoscenza approfondita del substrato è alla base delle considerazioni idrologiche che verranno effettuate nei capitoli seguenti; per questo motivo, le principali proprietà di questo mezzo poroso, sono state determinate sperimentalmente in parte presso il

Luce di maglia [mm]	Trattenuto [gr]	Trattenuto [%]	Passante Cumulato [%]
14	0	0.0	100
12.5	7.16	1.9	98.08
10	14.28	3.8	94.24
8	84.94	22.8	71.43
6.3	67.7	18.2	53.24
4	95.4	25.6	27.62
2	26.98	7.2	20.37
1	12.12	3.3	17.12
0.5	9.18	2.5	14.65
0.25	10.06	2.7	11.95
0.125	10.92	2.9	9.02
0.075	5.54	1.5	7.53

TABELLA 3.4: Curva granulometrica campione A: luce di maglia, peso del passante, percentuale del trattenuto, passante cumulato percentuale.

Laboratorio di Ingegneria Geotecnica del DICAM ed in parte presso il il Laboratorio di Fisica del Suolo del DipSA, entrambi dell'Università di Bologna.

La **granulometria** è la rappresentazione, mediante la determinazione di una curva sperimentale, della distribuzione percentuale dei grani di un terreno. La curva granulometrica è stata determinata per via umida, mediante setacciatura meccanica. L'analisi è stata effettuata per due campioni:

- A: campione originario di suolo;
- B. campione di suolo prelevato dal tetto sperimentale dopo un anno dall'installazione.

La percentuale di materiale trattenuto da ciascun setaccio è stata calcolata come:

$$Trattenuto_i = \frac{V_{trat_i}}{V_{totale}} * 100 \quad (3.1)$$

in cui V_{trat_i} rappresenta il peso del materiale trattenuto dal setaccio i_{simo} e V_{totale} è il volume totale del campione. Il volume cumulato è stato ottenuto sottraendo al 100 % la percentuale di materiale. La luce dei setacci utilizzati, la percentuale di materiale trattenuto da ciascuno di essi ed il passante cumulato dei campioni di substrato inalterato (A) e prelevato in sito dopo un anno dalla posa (B) sono riassunte rispettivamente in tabella 3.4 e in tabella 3.5. Questi dati sono stati utilizzati per la determinazione della curva granulometrica. La Fig. 3.9 rappresenta la curva granulometrica del campione A, mentre la curva in Fig. 3.10 rappresenta quella del campione B. Entrambe le curve presentano in ordinata, in scala naturale, la % di materiale passante, ovvero più fine della dimensione della luce del setaccio utilizzato, mentre il corrispondente diametro

Luce di maglia [mm]	Trattenuto [gr]	Trattenuto [%]	Passante Cumulato [%]
16	0	301.60	100.00
14	9.28	292.32	96.92
12.5	11.02	281.30	93.27
10	3.68	277.62	92.05
8	45.4	232.22	77.00
6.3	72.2	160.02	53.06
4	74.58	85.44	28.33
2	13.62	71.82	23.81
1	7.54	64.28	21.31
0.5	6.14	58.14	19.28
0.25	8.9	49.24	16.33
0.125	9.78	39.46	13.08
0.075	4.62	34.84	11.55

TABELLA 3.5: Curva granulometrica campione B: luce di maglia, peso del passante, percentuale del trattenuto, passante cumulato percentuale.

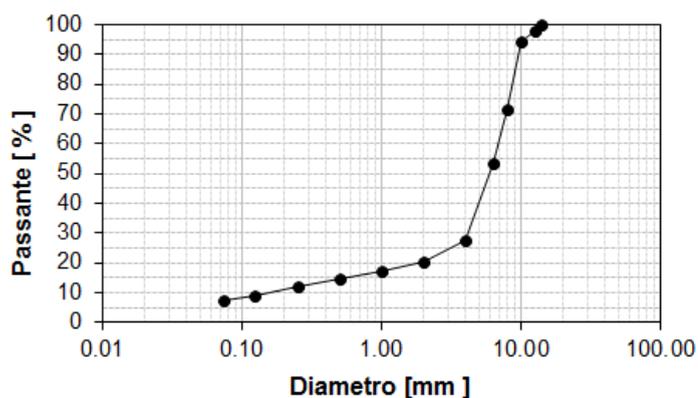


FIGURA 3.9: Curva granulometrica Campione A

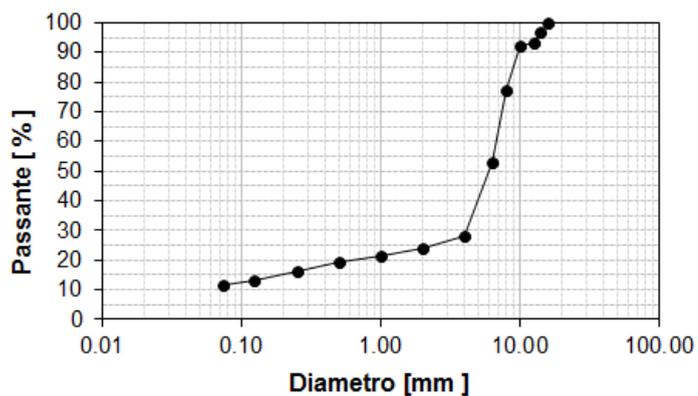


FIGURA 3.10: Curva granulometrica Campione B

dei grani in mm è riportato in ascissa in scala logaritmica. L'andamento di una curva granulometrica è usualmente espresso dal coefficiente di uniformità C :

$$C = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.2)$$

in cui D_{10} è la luce del setaccio per cui il 10% delle particelle sono minori di questa grandezza, analogamente per il D_{60} . I coefficienti di uniformità maggiori di 40 per entrambi i campioni, ne consegue che il substrato può essere considerato un campione ben graduato. La Fig. 3.11 evidenzia come, nonostante il campione B sia stato prelevato un anno dopo la posa, i due campioni presentano una curva granulometrica simile.

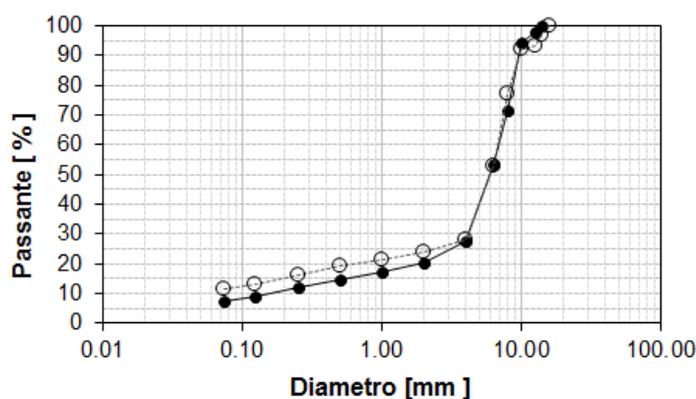


FIGURA 3.11: Confronto tra le curve granulometriche dei due campioni: in nero il campione A ed in grigio il campione B

Il **peso specifico reale** esprime il peso unitario dei costituenti solidi, esso è definito dalla seguente equazione:

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (3.3)$$

in cui V_s è il volume del solido e P_s è il peso del solido. Il peso specifico reale è stato misurato sperimentalmente in laboratorio sia per il campione A che per il campione B con il metodo del picnometro. La prova ha consentito di trovare un valore di γ_s pari a $26,5 \text{ kN/m}^3$

La **densità apparente** (ρ_{dry}) meglio nota come *bulk density* è un indicatore del grado di compattazione del suolo e può essere espresso come:

$$\rho_{dry} = \frac{M_{dry}}{V_{tot}} \quad (3.4)$$

dove M_{dry} è la massa di suolo secco (passaggio in forno a $105^\circ C$ per 24 ore) e V_{tot} è il volume totale. La densità è un parametro che esprime la capacità del suolo di fungere da supporto strutturale e di garantire il movimento dell'acqua e l'aerazione

Plot	γ_s kN/m^3	ρ_{dry} kg/m^3	n %
S	26.5	1007	62
NR ₁₂	26.5	940	65
NR ₈	26.5	610	77

TABELLA 3.6: Proprietà di base del substrato: peso specifico reale, densità apparente e porosità

del suolo stesso. Alti valori di densità indicano una bassa porosità del suolo o una forte compattazione. La densità a bulbo secco è stata determinata raccogliendo in sito dei volumi noti di suolo e poi ponendo in forno a 105 °C per 24 ore il materiale ad essicare. La definizione di valori di riferimento per la densità apparente non è sempre significativa in quanto si tratta di una proprietà dinamica che cambia con il tempo in funzione dell'andamento termo-pluviometrico o ad esempio delle caratteristiche delle matrici minerali ed organica.

La **porosità**, usualmente indicata con la lettera n , esprime il volume degli spazi vuoti (V_{vuoti}) del terreno come rapporto sul volume totale (V_{tot}).

$$n = \frac{V_{vuoti}}{V_{tot}} \quad (3.5)$$

La porosità di un terreno può variare 0 ad 1. Il valore 0 corrisponderebbe ad un terreno assolutamente privo di pori, cioè costituito unicamente dalla frazione solida, ed il valore 1 corrisponderebbe al caso, non reale, di un terreno costituito unicamente da pori. La porosità può essere espressa in percentuale, e in questo caso la variazione è fra 0 % e 100 %. La porosità media del substrato è pari al 60%, questo valore esprime un volume dei pori molto elevato, molto più simile a quello delle argille i cui valori si attestano attorno al 40-70% che a quello della ghiaia il cui valore di porosità è usualmente nel range 20-35%. La tabella 3.6 mostra i valori del peso specifico reale, della densità apparente e della porosità per 3 volumi di substrato prelevati in sito nel mese di Ottobre del 2014. Il campione S è stato prelevato dal SR, il campione NR₈ ed il campione NR₁₂ sono stati prelevati nel Native roof nei plots con spessore del substrato rispettivamente pari a 8 cm e 12 cm. La Fig. 3.12 mostra il prelievo di un volume di suolo dal tetto SR, successivamente utilizzato per la determinazione delle proprietà di base.

3.2.5.2 Curva di ritenzione idrica

Il contenuto di acqua volumetrico (θ , VWC: volumetric water content) fornisce la frazione di volume totale (V_{totale}) occupato dall'acqua (V_w) e può essere calcolato mediante



FIGURA 3.12: Volume di substrato prelevato dal Sedum Roof

la seguente formula:

$$\theta = \frac{V_w}{V_{totale}} \quad (3.6)$$

Il contenuto di acqua in volume (θ) non deve essere confuso con il contenuto naturale d'acqua o contenuto gravimetrico d'acqua (u , GWC: gravimetric water content) che invece esprime il rapporto tra la massa dell'acqua (M_w) e la massa del campione essiccato (M_{dry}) a 105°C, temperatura alla quale evapora completamente l'acqua libera o interstiziale.

$$u = \frac{M_w}{M_{dry}} \quad (3.7)$$

Il contenuto in acqua volumetrico (θ) ed il contenuto in acqua gravimetrico u , possono essere correlati tra loro tramite la densità apparente del substrato (ρ_{dry}) e la densità dell'acqua (ρ_w) mediante la seguente relazione: la conversione del contenuto d'acqua gravitazionale in contenuto d'acqua volumetrico è possibile moltiplicando u per la densità apparente del materiale.

$$\theta = u * \frac{\rho_{dry}}{\rho_w} \quad (3.8)$$

Il contenuto d'acqua volumetrico è un parametro basilare quando si vuole stimare il flusso di acqua in suoli parzialmente saturi, usualmente questo parametro è strettamente correlato al potenziale idrico (ψ_t , soil water potential) che fornisce l'energia potenziale posseduta dall'acqua presente nel suolo, in riferimento alle condizioni dell'acqua libera. Il potenziale idrico controlla diversi processi quali l'infiltrazione dell'acqua, l'evaporazione, la crescita delle piante e l'attività microbica (Bittelli and Flury, 2009). Il potenziale idrico è la combinazione del potenziale matriciale (ψ_m), gravitazionale (ψ_g), osmotico (ψ_o), e idrostatico (ψ_h).

$$\psi_t = \psi_m + \psi_g + \psi_o + \psi_h \quad (3.9)$$

Il potenziale gravitazionale è determinato dall'elevazione dell'acqua contenuta nel suolo rispetto alla quota di riferimento. Il potenziale matriciale è causato dalle forze (capillarità e adsorbimento) che il suolo esercita sull'acqua. Il potenziale osmotico è causato dalla

presenza di soluti nel suolo che diminuiscono il potenziale dell'acqua. Il potenziale idrostatico è determinato dalla pressione esercitata dall'acqua che si trova sopra il volume di suolo che si sta considerando [Tuller and Or \(2005\)](#). La combinazione del contenuto in acqua volumetrico e del potenziale idrico consentono la determinazione della curva di ritenzione idrica (SWRC= soil water retention curve). Bittelli e Flury, ([Bittelli and Flury, 2009](#)) affermano che esistono fundamentalmente due metodi per la determinazione della curva di ritenzione idrica:

- determinazione sperimentale della curva;
- derivazione della curva di ritenzione dalla conoscenza delle proprietà base del suolo mediante l'utilizzo di pedofunzioni.

La determinazione sperimentale della curva può avvenire mediante l'utilizzo di innumerevoli metodi sperimentali, tra i quali, le piastre a pressione, anche chiamate piastre di Richards (PR), sono tra i metodi più diffusi ([Bittelli et al., 2009](#)). Tuttavia negli ultimi anni numerosi studi hanno dimostrato che le PR determinano numerosi errori di misura, in particolare a potenziali intermedi e molto negativi ([Bittelli and Flury \(2009\)](#); [Campbell and Campbell \(2005\)](#)). In particolare ([Bittelli and Flury, 2009](#)) dimostrano che questi errori hanno significative ripercussioni sulla parametrizzazione delle proprietà idrologiche, peraltro di grande importanza per la risoluzione delle equazioni di flusso idrico. Per poter ovviare a questi errori la curva di ritenzione idrica è stata determinata usando un metodo a pressione di vapore, basato sul punto di rugiada (WP4-T, Decagon Dev., Inc). Una dettagliata descrizione della metodologia per il WP4-T è presente in [Campbell and Campbell \(2005\)](#) ed in [Bittelli and Flury \(2009\)](#) che hanno anche evidenziato i vantaggi e gli svantaggi di questa tecnica rispetto all'utilizzo delle piastre di Richards. Le misure sperimentali puntuali di potenziale matriciale e contenuto idrico sono state effettuate presso il laboratorio di Fisica del Suolo del DipSA dell'Università di Bologna. La parametrizzazione della curva di ritenzione idrica è stata ottenuta mediante ottimizzazione non lineare dei parametri della funzione di van Genuchten ([Van Genuchten, 1980](#)) come illustrato in Fig. 3.13a.

La curva di ritenzione (Fig. 3.13 a) e la curva di conducibilità idraulica (Fig. 3.13 a) rappresentano le più importanti proprietà del suolo. Entrambe le curve presentano in ordinata il potenziale matriciale (soil water potential) espresso in m di colonna d'acqua. [Schofield \(1935\)](#) ha proposto di esprimere il potenziale dell'acqua attraverso una scala logaritmica ed ha suggerito l'uso del pF definito come il logaritmo decimale del valore assoluto di h espresso in cm : $pF = \log_{10}(h)$ che talvolta è ancora utilizzato. Ad esempio, un valore del potenziale h di -10 cm corrisponde a $pF = 1.0$. La curva di ritenzione è lo strumento che consente la determinazione di due parametri molto importanti che

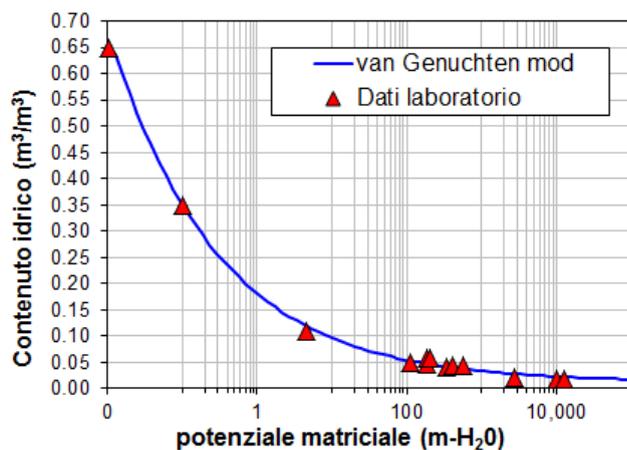
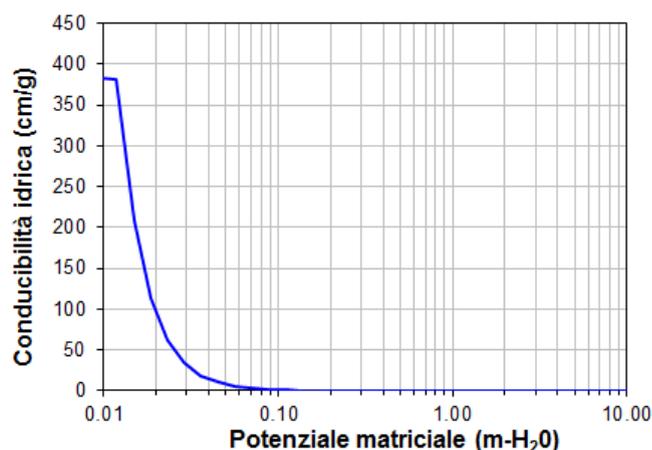
(a) *Curva di ritenzione substrato Seic*(b) *Curva di conducibilità idrica substrato Seic*

FIGURA 3.13: Curva di ritenzione e Curva di conducibilità idrica ottenute mediante ottimizzazione non lineare dei parametri della funzione di VanGenuchten (Van Genuchten, 1980).

sono la capacità di campo (FC, field capacity) ed il punto di appassimento (WP, wilting point). La capacità di campo rappresenta la quantità di acqua presente in un campione di suolo al netto dell'acqua gravifica. Esprime quindi la quantità di acqua a disposizione delle piante ed è un parametro che varia in funzione della tipologia di suolo considerato. Il punto di appassimento corrisponde al grado di umidità del suolo tale per cui la forza di suzione delle radici è minore di quella di ritenzione dell'acqua da parte del terreno e, per conseguenza, le piante non possono estrarre dal terreno. Convenzionalmente, all'interno dell'apparato radicale il potenziale dell'acqua (proprietà fisica dell'acqua che, nel substrato, dipende principalmente dalla quantità d'acqua e dalla struttura del substrato) non riesce a scendere al di sotto di -1.5 MPa , pena la morte dei tessuti della radice. In conclusione, grazie alle curve sopra descritte è stato possibile calcolare i seguenti parametri:

- capacità di campo 35 % v/v (a pF1);
- punto di appassimento permanente 0.06 % v/v (a -1.5 MP).

3.2.6 Vegetazione

La copertura vegetale costituisce l'elemento cardine dei tetti verdi e la selezione della tipologia di vegetazione, come sottolineato da Dvorak e Volder [Dvorak and Volder \(2010\)](#) costituisce la scelta progettuale più critica. La tipologia di essenze vegetali, come precedentemente descritto, viene effettuata essenzialmente in funzione: (a) delle condizioni meteo climatiche dell'area in esame, (b) dello spessore del substrato ed infine (c) del livello di manutenzione tollerata. La città di Bologna è collocata nella zona climatica E, 2259 GR/G, alla quale corrisponde un clima sub-mediterraneo caratterizzato dalla presenza, durante i mesi estivi, di un periodo arido, meno accentuato di quello che si riscontra in ambienti mediterranei in senso stretto, ma comunque presente e limitante per la sopravvivenza delle specie vegetali e di un periodo invernale freddo, in cui la temperatura notturna spesso scende sotto gli 0°C ed in cui le nevicate non sono infrequenti. In tali condizioni climatiche e soprattutto tenendo in considerazione i limitati spessori di substrato disponibili (8, 10, 12 *cm*) si sono selezionate, in collaborazione con il DipSA (Dipartimento di Scienze Agrarie) della Università di Bologna, delle specie vegetali che la selezione naturale ha reso idonee a sopravvivere in ambienti sottoposti a condizione di moderata umidità estiva e temperature rigide durante il periodo invernale. Le tipologie di vegetazione selezionate sono state fondamentalmente due:

- Mix di specie Sedum;
- Mix di tre specie provenienti da praterie semiaride, "mesombreti".

La prima tipologia di vegetazione, che è quella comunemente fornita dalla Harpo nel pacchetto "*Mediterranean green roof*" è stata collocata nel plot SR. La seconda tipologia di vegetazione, che costituisce il cuore della sperimentazione della Scuola di Agraria è stata posizionata seguendo i medesimi pattern sui tre spessori del tetto NR.

3.2.6.1 Sedum

Il Sedum è la specie vegetale maggiormente utilizzata in tetti verdi di tipo estensivo ([Blanusa et al., 2013](#); [Zhao et al., 2014](#)) grazie alla elevata capacità di sopravvivenza in ambienti aridi, dovuta alle caratteristiche morfologiche xerofitiche, alla scarsa necessità di manutenzione ([Monterusso et al., 2005](#)) e alla provata efficienza nello contribuire alla

riduzione del run-off (Carson et al., 2013; Stovin, 2010). La selezione del mix di Sedum utilizzato nel presente studio deriva dalla necessita di utilizzare una specie vegetale semplice da impiantare, economica e con un accrescimento veloce. Il Sedum inoltre, è una pianta ampiamente diffusa nella prima periferia Bolognese ed in particolare nel vicino Parco Regionale dei Gessi. Le specie di Sedum, contenute nel mix ed illustrate in Fig. 3.14, sono le seguenti:

- *Sedum hispanicum*
- *Sedum album*
- *Sedum floriferum*
- *Sedum sexangulare*

(a) *Sedum hispanicum*(b) *Sedum album*(c) *Sedum floriferum*(d) *Sedum sexangulare*FIGURA 3.14: Varietà di *Sedum* contenute nel mix

Le piante appartenenti alla specie Sedum presentano un'altra importante peculiarità che è quella di aver adattato il loro metabolismo ai climi torridi. Il Sedum infatti, appartiene a una delle rare specie in grado di adottare, in condizioni di particolare stress idrico o temperature elevate, il metabolismo acido delle *crasulacee* o CAM (Crassulaceae Acid methabolism). Le specie vegetali che attivano il metabolismo CAM separano temporalmente la fase di acquisizione dell'anidride carbonica da quella di fissazione di questa molecola tra il giorno e la notte. Le piante con metabolismo di tipo CAM lasciano gli

stomi chiusi di giorno (Consoli, 2012; Jim, 2014b) perché, in questo modo, riescono a salvaguardare il vapore acqueo contenuto nelle foglie che, a causa dei processi evolutivi di adattamento, hanno assunto delle forme variegata e particolari. Il Sedum è stato messo a dimora il 7 Luglio del 2013 per spargimento di talee come evidenziato in Fig. 3.15 e successivamente, a causa del non idoneo periodo di semina, irrigato per alcune settimane per consentire la formazione dell'apparato radicale. La copertura vegetale, come evidenziato in Fig. 3.16, dopo qualche mese dalla messa a dimora ha iniziato a propagarsi in modo abbastanza omogeneo.



(a) Talea di *Sedum floriferum*



(b) Plot SR durante la piantumazione per spargimento

FIGURA 3.15: Fase di piantumazione per talee del SR

La Fig. 3.17 mostra l'andamento della coltura durante il corso dell'anno. L'ultima figura mette in evidenza il caratteristico colore rossastro assunto durante il periodo invernale. Dopo circa un anno dalla semina la copertura vegetale è uniforme, tuttavia si è riscontrato il sopravvento della specie *Sedum hispanicum* sulle altre. Si ritiene importante sottolineare che la parcella SR durante tutto il 2014, è stata oggetto di una manutenzione praticamente nulla che ha previsto unicamente la rimozione sporadica delle piante infestanti. La capacità di questa specie di sopravvivere in ambienti aridi e ad alte



(a) Talee di sedum a 35 giorni dalla piantumazione



(b) Plot SR il 9 Settembre 2013 (2 mesi dopo la piantumazione)

FIGURA 3.16: Fasi di accrescimento delle talee di Sedum



FIGURA 3.17: Evoluzione temporale della coltura Sedum nel SR plot

temperature ha consentito di poter escludere dalle pratiche manutentive: l'irrigazione estiva, lo sfalcio periodico e la fertilizzazione del terreno. La possibilità di ridurre al minimo la manutenzione è un fattore molto importante in particolare nell'ambito di quei tetti verdi che non sono dotati di impianto irriguo o che non sono facilmente raggiungibili.

3.2.6.2 Gramineae e Leguminosae

La copertura vegetale del Plot NR è stata studiata in modo tale da garantire lo stesso pattern di vegetazione nei 3 subplots. Le specie selezionate sono 3 specie provenienti da praterie semi aride (mesombreti):

- *Bromus erectus* Huds. (Gramineae)
- *Lotus corniculatus* L. (Leguminosae)
- *Dorycnium pentaphyllum* Scop. (Leguminosae)

Tali comunità sono abbastanza frequenti nel territorio regionale, nell'ambito della fascia collinare-submontana. Il *Bromus erectus*, noto anche con il nome di *Forasacco eretto* (Fig. 3.18 a), è una pianta erbacea perenne della famiglia delle Poaceae. Le radici

(a) *Bromus erectus*(b) *Dorycnium pentaphyllum*(c) *Lotus corniculatus*(d) *Lotus corniculatus* durante la fase di fioritura

FIGURA 3.18: Mix di vegetazione provenienti da praterie semiaride, “mesombreti” ed impiantata nel plot NR

possono arrivare fino a 60 cm di profondità; nel complesso la pianta può raggiungere un'altezza da 40 a 120 centimetri. Gli steli sono sottili, forti e rigidi con 3-4 nodi. Ha foglie basali di color verde-giallastro o grigio-verde, strette e lunghe. Le foglie superiori sono generalmente piatte e vagamente pelose o glabre. Le infiorescenze crescono in pannocchie alte 10-25 centimetri in posizione verticale, di colore dal viola al rosso o verde. Usualmente questa specie cresce spontaneamente nei suoli calcarei Europei, del sud-est dell'Asia e del Nord-Ovest dell'Africa.

Il *Dorycnium pentaphyllum* (Fig. 3.18 b) è una pianta erbacea con fusto legnoso con rami eretti o ascendenti. Le foglie, con 5 segmenti quasi uguali fra loro, sono inserite quasi direttamente sul fusto e sono pubescenti. I fiori sono piccoli, presentano la corolla bianca e papilionacea e sono portati in ombrelle. Il frutto invece è un legume ovoide e glabro. Cresce prevalentemente in prati (0-1300 m) con suoli calcarei. L'epoca di fioritura va da maggio a luglio. È ampiamente diffuso su tutto il territorio nazionale.

Il *Lotus corniculatus* (Fig. 3.18 c, d), noto con il nome di *Ginestrino*, appartiene alla famiglia delle Fabaceae. È un'erba perenne a fusto pieno e ricurvo alla base, alta da 10 a 30 cm. Le foglie, composte, sono divise in tre foglioline romboidali. I fiori, gialli, sono riuniti in ombrellette di 2-6 elementi (maggio-agosto). I legumi, sottili e cilindrici, sono di colorito brunastro. Il Lotus è originario del Vecchio Mondo (Europa, Asia e Nordafrica), ma oggi è naturalizzato anche in Nordamerica e in altre parti del mondo. In Europa è

(a) *Cassettine provenienti dall'AUB*(b) *Impianto delle piantine sul plot NR*(c) *Panoramica del plot NR alla fine della fase di piantumazione*(d) *Panoramica del plot NR alla fine della fase di piantumazione durante la fase di fioritura*

FIGURA 3.19: Fase di piantumazione del tetto NR

presente in tutti i paesi, dall'Islanda alla Grecia, ed in Italia in tutte le regioni. Questa pianta costituisce un importante fonte di nettare per molti insetti.

Le piante sopra descritte, nonostante abbiano subito degli adattamenti per poter sopravvivere in ambienti aridi, presentano un metabolismo di tipo tradizionale C3; ciò significa che, al contrario delle specie CAM, anche durante il periodo estivo il processo evapotraspirativo avviene mediante l'apertura diurna degli stomi.

I semi di queste 3 specie, raccolti direttamente in natura presso il Parco Regionale di Monte Sole, sono stati coltivati presso il vivaio dell'Azienda Agraria dell'Università di Bologna (AUB). La Fig. 3.19 mostra la fase di piantumazione delle piantine che, dopo essere state coltivate in cassette contenenti il substrato sono state trasportate presso la Scuola di Ingegneria ed impiantate in data 12 Luglio 2013. In Fig. 3.19 d, è possibile notare come la parte terminale sinistra dei 3 plots costituenti il NR è stata lasciata appositamente vuota e successivamente seminata ad Ottobre 2013. Data la particolare e non del tutto idonea epoca di impianto sul tetto, si è provveduto ad un'irrigazione giornaliera durante l'intero periodo estivo, per rendere possibile l'attecchimento. Successivamente, l'irrigazione è stata rallentata e poi sospesa, in modo da portare progressivamente l'impianto verso condizioni simili a quelle naturali. Inizialmente le leguminosae sembravano aver raggiunto un maggiore accrescimento ma, con il passare del tempo, il *Bromus erectus* ha preso il sopravvento sulle altre specie. Il plot

Periodo	Durata [min]	Volume irriguo [l * m ² /giorno]
22 Mag. - 07 Lug.	10	3.3
08 Lug. - 09 Ago.	5	1.6
09 Ago. - 25 Ago.	10	3.3

TABELLA 3.7: Gestione dell'impianto irriguo per il NR plot durante l'estate 2014

NR è dotato di un impianto irriguo a pioggia (programmabile ma non controllabile in remoto) che è stato utilizzato durante il periodo estivo (giugno- agosto 2014) secondo lo schema riportato nella tabella 4.5. Oltre all'irrigazione le pratiche manutentive eseguite su questo plot sono state la concimazione (Maggio 2014) e lo sfalcio (3 volte in un anno) che ha richiesto: l'utilizzo di un decespugliatore, un operatore e lo smaltimento degli sfalci.

3.3 Sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio, che costituisce il fulcro dell'apparato sperimentale, è stato selezionato con la collaborazione della Columbia University ed in particolare con il gruppo *Green roofs* diretto dalla Prof. P.J. Culligan (Department of Civil Eng. & Eng. Mechanics), con l'obiettivo di gettare le basi per la creazione di standard comuni per il monitoraggio e lo studio delle prestazioni dei tetti verdi.

L'apparato sperimentale include strumenti per la misurazione delle variabili meteorologiche e per la stima dei deflussi, sonde per la misura del contenuto volumetrico in acqua del substrato, termocoppie e termometri per la misurazione del profilo verticale di temperatura ed infine alcune ispezioni termografiche.

3.3.1 Stazione meteorologica

La stazione meteo Onset Hobo U30 (Hobo) visibile in Fig. 3.21, è stata installata ad Agosto del 2013 sulla sommità del plot SR. Essa è in grado di acquisire dati ogni secondo, mediarli sui 5 minuti e trasmetterli attraverso un collegamento wifi al servizio Onset Hobolink attraverso il quale i dati sono visualizzabili on line con aggiornamento orario. Lo stesso tipo di stazione meteo è stata installato su alcuni tetti della città di New York come descritto da [Carson et al. \(2013\)](#); [Hakimdavar et al. \(2014\)](#).

La stazione Hobo è dotata di un pluviometro a bascula (altezza: 22.8 cm, diametro: 15.4 cm, orifizio ricevente: 15.4 cm) caratterizzato da una precisione di $\pm 1.0\%$ sopra i 20 mm/hour e con temperature tra gli 0 e i 50°C. Il pluviometro è caratterizzato da una



FIGURA 3.20: Stazione meteo Onset Hobo U30 (Hobo)

FIGURA 3.21: Sonda capacitiva ECH_2O (Decagon) per la misurazione dell'umidità del suolo)

sensibilità di 0.2 *mm* a scatto.

La misurazione del contenuto volumetrico in acqua del suolo viene effettuata mediante l'utilizzo di 2 sonde capacitivie per installazioni superficiali ECH_2O della Decagon che misurano la costante dielettrica del suolo, la quale è direttamente correlabile con θ (volumetric water content). I sensori capacitivi di superficie sono formati da due elettrodi ad asta che sono inseriti nel terreno ed hanno lo stesso principio di funzionamento delle sonde capacitivie di tipo TDR per installazione profonda (Tarantino and Pozzato, 2008). A causa della diversa composizione mineralogica dei suoli e della diversa densità o tessitura, la precisione dello strumento si attesta intorno al $\pm(3 - 4)\%$. Tuttavia, date le caratteristiche non convenzionali del substrato, si è optato per effettuare un'opportuna calibrazione delle sonde con lo scopo di migliorare la corrispondenza tra valori misurati e proprietà del substrato. Le sonde capacitivie sono direttamente collegate alla stazione meteo, anche in questo caso si ha un'acquisizione ogni secondo che vengono mediate sui 5 minuti e successivamente memorizzate. La stazione meteo è in grado di misurare altri parametri meteorologici quali: direzione e velocità del vento, temperatura dell'aria, irraggiamento solare, umidità relativa, punto di rugiada, radiazione fotosinteticamente

attiva (photosynthetically active radiation, PAR).

3.3.2 Misurazione del runoff

La misurazione del run-off viene effettuata mediante l'utilizzo di alcuni sensori, sviluppati nei laboratori della Columbia University e collegati con il data logger presente nella stazione Hobo. I sensori, descritti in [Carson et al. \(2013\)](#), sono stati adattati al caso studio italiano. Essi sono costituiti da un tubo circolare in plexiglass dotato all'estremità di uno stramazzo triangolare con un angolo di 20° (Fig. 3.22). All'interno del tubo circolare è contenuto un sensore Senix TSPC-30S1 ad ultrasuoni che misura l'altezza della lama d'acqua che si forma dentro il dispositivo con una risoluzione di 0.086 mm. All'aumentare della portata, il livello dell'acqua a monte dello stramazzo si innalza, il sensore ad ultrasuoni misura l'innalzamento del pelo libero e lo trasforma in un incremento del voltaggio. I dispositivi sono stati inseriti all'interno dei pluviali, attraverso i quali, viene anche smaltita l'acqua che stramazza. Tali dispositivi funzionano per intervalli di temperatura tra i 0° e i 70°C e sono stati calibrati per portate che possono oscillare nel range 0.005-2.5 l/s. I sensori hanno subito una prima calibrazione presso i laboratori della Columbia University ed una seconda calibrazione presso il laboratorio LIDR appena prima dell'installazione. La calibrazione è avvenuta collocando i sensori in condizioni simili a quelle di campo e registrando contemporaneamente i valori di portata in ingresso ed il corrispondente voltaggio. Queste coppie sperimentali di valori sono state interpolate per ottenere la curva di calibrazione caratteristica di ogni strumento. Immediatamente dopo la fase di calibrazione i sensori sono stati installati sul campo e collegati al data logger della stazione Hobo.

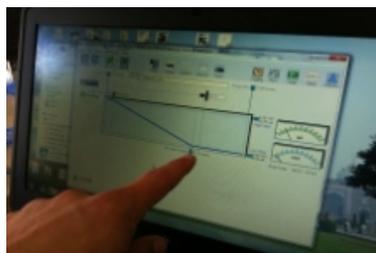
Sensore	Plot	Area drenata [m ²]
W14	SR	57
W15	RR	57
W16	NR	72

TABELLA 3.8: Aree di pertinenza dei misuratori di portata.

Una volta scaricati i dati dal data logger, i valori di voltaggio vengono convertiti in portata mediante l'equazione di calibrazione. La normalizzazione di questi dati rispetto all'area drenata consente la determinazione dell'altezza del runoff nei 5 minuti di intervallo considerati. Data la grandezza dei plots è stato necessario installare 3 misuratori di portata, secondo lo schema riportato in Fig. 5.9. La tabella ?? illustra l'area di pertinenza di ciascun dispositivo.



(a) Misuratori di portata durante la fase di calibrazione.



(b) Calibrazione dei sensori



(c) Misuratori di portata prima dell'installazione; la linea tratteggiata gialla evidenzia lo stramazzo.



(d) Installazione sensore W15

FIGURA 3.22: Misuratori di portata: fase di calibrazione e installazione.

Le formule seguenti, in cui x rappresenta il voltaggio misurato [V] ed y il runoff corrispondente in [l/sec], descrivono le equazioni di calibrazione per ciascun sensore:

W14

$$y = [(3386.19806497 * x^5 - 19933.67805347 * x^4 + 38508.97646362 * x^3 - 19786.42352146 * x^2 + 6866.11003254 * x - 1200) * 60] / 1000$$

W15

dal 10 Oct. 2013 al 04 Feb. 2014:

$$y = [(3883.01 * x^5 - 27928.27 * x^4 + 69744.37 * x^3 - 64761.08 * x^2 + 27407.97 * x - 4660) * 60] / 1000$$

dal 05 Feb. 2014 :

$$y = [(3888.53 * x^5 - 28169.57 * x^4 + 71015.52 * x^3 - 67089.81 * x^2 + 28869.55 * x - 4975) * 60] / 1000$$

W16

$$y = [(1665.6553257 * x^4 - 10664.6086727 * x^3 + 30171.8259674 * x^2 - 21853.3316172 * x + 4600) * 60] / 1000$$

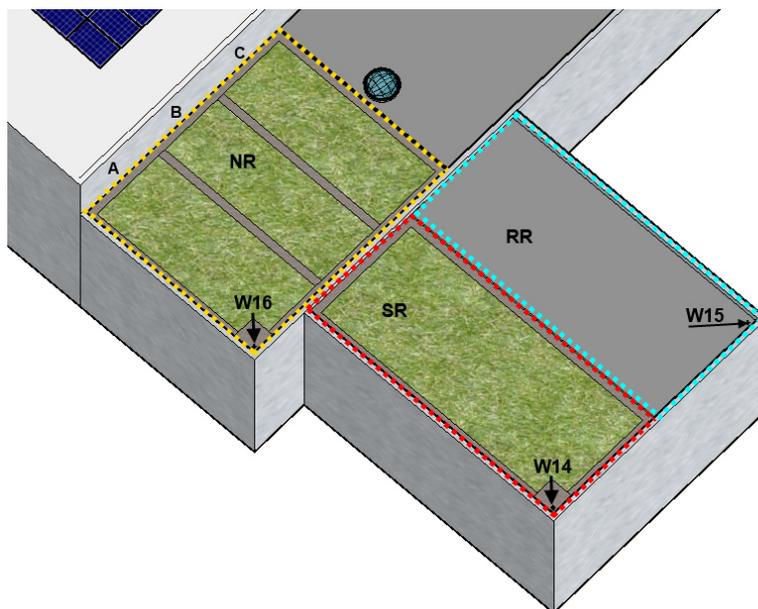


FIGURA 3.23: Area di pertinenza misuratori di portata. L'area evidenziata in giallo, corrispondente ai 3 subplots costituenti il Native Roof, viene monitorata dal sensore W16. I sensori W14 e W15 misurano il runoff rispettivamente del plot Sedum roof (area rossa) e del Reference Roof (area ciano)

I misuratori di portata si sono dimostrati degli strumenti attendibili ed idonei alla misurazione delle basse portate. Tuttavia le ridotte dimensioni degli stramazzi ed il fatto che gli strumenti si trovino all'interno dei pluviali hanno determinato la necessità di una manutenzione periodica per la rimozione di foglie ed altro materiale che incastrandosi causa un'alterazione dei livelli e quindi delle portate.

3.3.3 Misurazione della temperatura

L'acquisizione dei dati di temperatura è avvenuta sia mediante l'analisi di immagini termografiche ad infrarossi (set. 2014) che attraverso l'ausilio di 8 termocoppie di tipo K (ott.2014 - feb.2015) e di due sonde di temperatura (nov.2013 - feb.2015).

Le acquisizioni termografiche sono state effettuate mediante l'ausilio di una termocamera, modello FLUKE TIR 400, ad alta risoluzione (campo visivo $24^{\circ} \times 17^{\circ}$) le cui principali caratteristiche tecniche sono quelle di operare nello spettro degli infrarossi dai $7.5 \mu m$ a $14 \mu m$ (onda lunga) nell'intervallo di temperature da $-20^{\circ}C$ a $+1200^{\circ}C$ con un'accuratezza di $\pm 2^{\circ}C$ o del 2%. Le riprese panoramiche dei tre tetti in contemporanea sono state effettuate mediante l'utilizzo di un obiettivo grandangolare ad infrarossi aggiuntivo (campo visivo $46^{\circ} \times 24^{\circ}$) caratterizzato da una risoluzione di $2.62 mRad$. La Fig. 3.24 mostra, a titolo puramente esemplificativo, due riprese panoramiche scattate il 27 Settembre alle 15:00, grazie all'ausilio del grandangolo, dalle quali emergono le

evidenti differenze di temperature tra la vegetazione del tetto verde Native e l'adiacente membrana bituminosa nera (c) e tra i tre plots in contemporanea (d). Le immagini termografiche sono accompagnate dalle rispettive fotografie nel campo del visibile.



(a) Plot NR_{12cm} e tetto di riferimento



(b) Panoramica dei 3 plot monitorati



(c) Immagine termografica del plot NR_{12cm} e tetto di riferimento



(d) Immagine termografica dei 3 plot monitorati

FIGURA 3.24: Fotografie e corrispettive immagini termografiche del tetto verde sperimentale in data 27/09/2014



(a) Termocoppie posizionate sui plots SR e RR



(b) Termocoppie posizionate sul plot NR

FIGURA 3.25: Termocoppie installate nei diversi plots per la determinazione dei profili verticali di temperatura

A partire dal mese di Ottobre 2014 si è preferito acquisire in continuo sia le temperature delle differenti superfici che quelle dell'aria sovrastante mediante l'ausilio di termocoppie.

Nome	Equazione calibrazione
T1	$y = 0.0004 * x^2 + 0.9874 * x - 0.0759$
T2	$y = 2E - 0 * x^2 + 1.0087 * x - 0.2793$
T3	$y = -0.0002 * x^2 + 1.0293 * x - 0.4063$
T4	$y = -0.0008 * x^2 + 1.0628 * x - 0.5251$
T5	$y = -0.0011 * x^2 + 1.091 * x - 0.6499$
T6	$y = -0.0006 * x^2 + 1.0607 * x - 0.5777$
T7	$y = -0.0001 * x^2 + 1.0296 * x - 0.3853$
T8	$y = 0.0001 * x^2 + 1.0096 * x - 0.2754$

TABELLA 3.9: Equazione di calibrazione delle termocoppie

Le termocoppie sono costituite da due conduttori di natura differente e saldati alle estremità, nei quali, se sottoposti ad un gradiente di temperatura, si instaura una differenza di potenziale. La tensione che si va a misurare è nota come Seebeck electromotive force (emf). Le termocoppie sono state calibrate presso il laboratorio di Fisica tecnica del DIN (Dipartimento Ingegneria Industriale) dell'Università di Bologna secondo quanto previsto dalla normativa vigente. Le equazioni di calibrazione sono riassunte in tabella 3.9. La variabile x corrisponde al valore di temperatura [°C] fornito dal datalogger mentre y è la temperatura [°C] corretta.

Le termocoppie sono collegate al data logger TC-08 prodotto dalla Pico Technology che consente l'acquisizione ed il salvataggio di un dato ogni minuto. Le termocoppie sono state collocate sui diversi plots e posizionate a diverse quote mediante l'ausilio di asticelle graduate con l'obiettivo di ricostruire il profilo verticale di temperatura (Fig. 3.25). La temperatura superficiale della guaina bituminosa del RR e quella del substa- to all'interfaccia con il filtro sono monitorate in continuo mediante l'ausilio di due sonde collegate ad un mini-registratore serie FT-90/USB-HT2 prodotto da Econorma.

Capitolo 4

Analisi dati sperimentali

Il presente capitolo illustra i dati raccolti durante la campagna di monitoraggio (luglio 2013-marzo 2015). Il capitolo è suddiviso in 3 parti in ciascuna delle quali vengono rispettivamente descritti e analizzati: i dati meteorologici, le osservazioni idrologiche e le osservazioni termiche

4.1 Clima e contesto

La città di Bologna è caratterizzata da un clima sub-continentale non influenzato dal mare. La classificazione climatica ufficiale (DPR n.412 del 26/08/1993) del comune di Bologna è Zona E, 2259 GR/G. Le estati sono usualmente calde e spesso afose e gli inverni possono essere rigidi, le nevicate non sono infrequenti. La temperatura media annuale è di circa 14 °C ma durante il corso dell'anno le temperature tipicamente variano tra i 3 °C e i 28 C come illustrato in Fig. 4.1 in cui sono rappresentati i boxplots delle temperature medie mensili registrate dal 1990 al 2013 per la stazione Bologna Borgo Panigale (Servizio IdroMeteoClima dell'ARPA Emilia Romagna). Le temperature massime giornaliere estive sovente superano i 35 °C mentre quelle invernali spesso scendono al di sotto degli 0 °C. La temperatura minima assoluta si registrò nel mese di Febbraio del 1991 con -16.9 °C mentre quella massima assoluta è stata registrata ad Agosto del 2013 ed è pari a 39.7 °C. Le mezze stagioni sono, in genere, miti e piovose e hanno breve durata. Il sopraggiungere della stagione calda, di fatto, spesso trasforma la primavera in estate già dai primi di maggio, e così il rigido inverno padano si presenta, sempre in termini empirici, già in alcune giornate di fine ottobre. La ventosità è modesta e questo, purtroppo, contribuisce alla formazione di nebbie e foschie ed alla permanenza di un elevato inquinamento atmosferico conseguente sia al traffico locale e di transito, sia alle esalazioni dei prodotti della combustione. Le precipitazioni medie in città oscillano, a seconda degli anni, da 400 mm ad oltre 1.000 mm. La Fig. 4.2

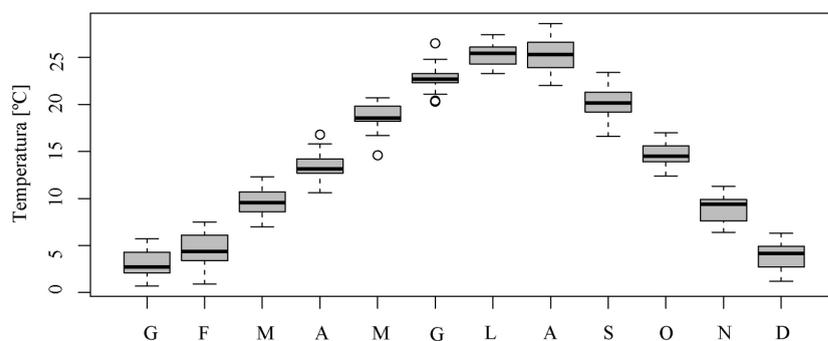


FIGURA 4.1: Dati storici di temperatura dall'anno 1991 al 2013 (Servizio IdroMeteoClima dell'ARPA) rappresentati per mezzo di boxplots in cui il bordo inferiore e superiore della scatola rappresentano rispettivamente il primo e il terzo quartile mentre la linea nera centrale rappresenta la mediana. I segmenti (i baffi) sono delimitati dal minimo e dal massimo dei valori ed i cerchi rappresentano gli outliers.

illustra i valori di precipitazione per la stazione Bologna Bacino idrografico dal 1935 al 2013. È possibile notare come negli anni si sono alternati periodi con piogge superiori alla media (corrispondente a 777 mm) e periodi siccitosi come quello a cavallo degli anni '90. Negli ultimi anni si stanno alternando valori di precipitazioni molto basse come quella registrata nel 2011 con 488 mm a valori superiori alla media come gli 888 mm del 2013.

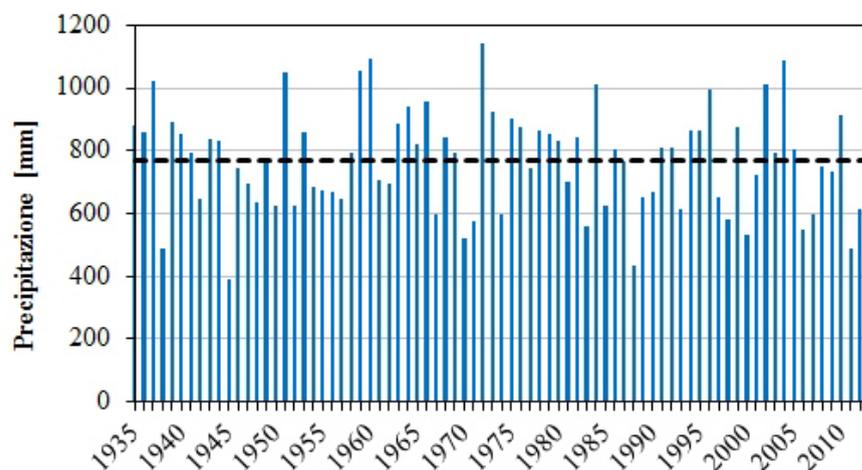


FIGURA 4.2: Precipitazioni annuali per la città di Bologna dal 1935 al 2013. La linea tratteggiata nera, corrispondente a 770 mm , rappresenta il valore medio annuale di precipitazione.

Le precipitazioni si concentrano solitamente in primavera ed autunno come illustrato in Fig. 4.3 in cui sono stati graficati i boxplot delle precipitazioni: dal 1935 al 2013. Non di meno si sono avute anche estati assai piovose come quella del passato 2014. Le precipitazioni nevose non sono infrequenti, talvolta anche assai abbondanti per una

zona di pianura. è rimasta negli annali meteorologici la nevicata del febbraio 1929, con circa 130 *cm* di neve e con la città interamente bloccata. Nel 2012 si è registrata un'altra nevicata storica con 96 *cm* di neve in pochi giorni.

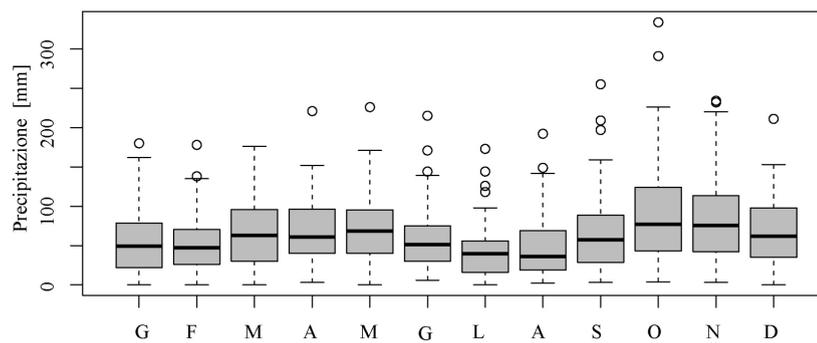


FIGURA 4.3: Boxplot mensili delle precipitazioni della città di Bologna dal 1935 al 2013 per la stazione Bologna Bacino idrografico. Il bordo inferiore e superiore della scatola rappresentano rispettivamente il primo e il terzo quartile mentre la linea nera centrale rappresenta la mediana. I segmenti (i baffi) sono delimitati dal minimo e dal massimo dei valori ed i cerchi rappresentano gli outliers.

4.2 Analisi dati meteoclimatici

La campagna sperimentale, oggetto del presente studio iniziò ad Agosto 2013 ed è tuttora in corso. In termini meteorologici una serie di questo tipo non può essere considerata lunga ma si ritiene che sia rappresentativa del sito di studio. I dati meteoclimatici sono stati misurati mediante la stazione meteorologica Onset Hobo U30 (Hobo) descritta nel capitolo precedente.

4.2.1 Precipitazioni

La Fig. 4.2.1 illustra le precipitazioni giornaliere registrate dal pluviometro presente nella stazione Hobo durante il periodo di monitoraggio (Lug. 2013/ Feb. 2015). L'elevato valore registrato a febbraio 2015 (60 mm) corrisponde ad una copiosa nevicata. Con

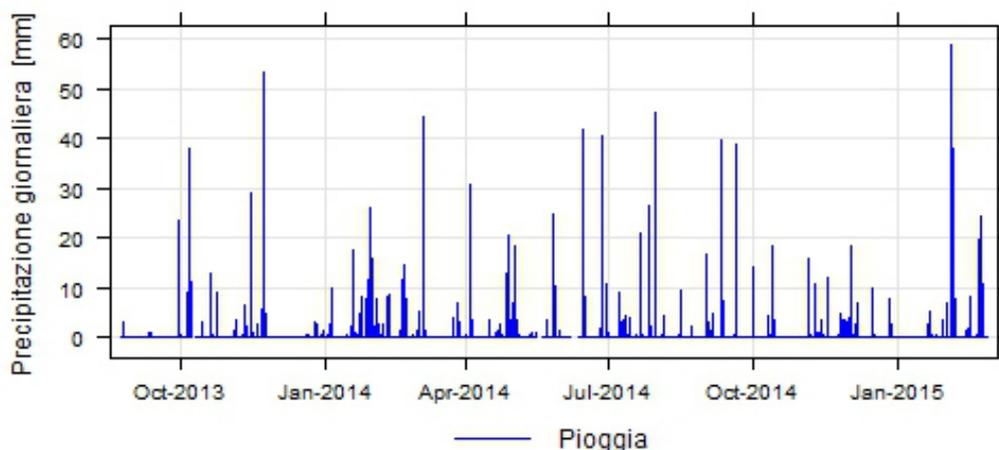
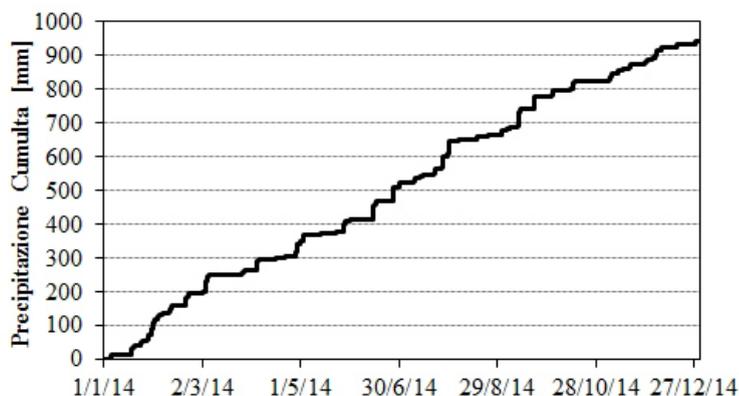


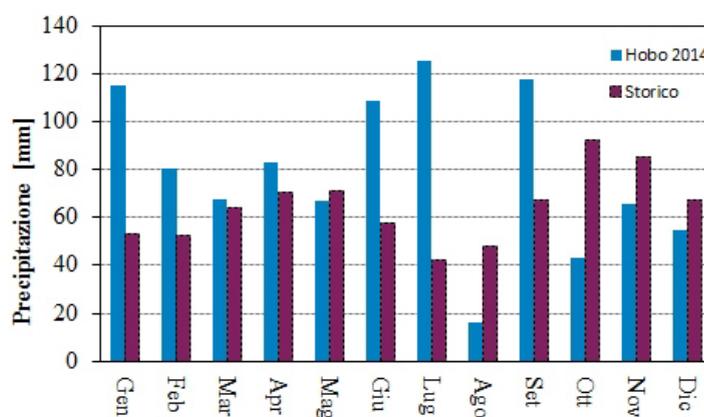
FIGURA 4.4: Valori giornalieri dell'altezza di precipitazione

un totale di 944 mm di precipitazione il 2014 si attesta tra gli anni più piovosi registrati per la città di Bologna dal 1935. In Fig. 4.5 è stata rappresentata: (a) la cumulata di pioggia registrata dalla stazione Hobo nel 2014 e (b) il confronto tra i valori medi mensili di precipitazione per la città di Bologna ed i valori di precipitazione misurati nel 2014 dalla stazione Hobo collocata sul tetto verde.

Come si evince dalla Fig. 4.5b, le precipitazioni sono state molto abbondanti in particolare nel periodo estivo (Giugno-Settembre) in cui la cumulata di pioggia è pari a 370 mm. Nel mese di Giugno la pioggia registrata è pari a 108.8 mm che corrisponde a poco meno del doppio del valore medio (58 mm). Nel mese di Luglio le precipitazioni, che spesso hanno superato i 90 mm/h di intensità, sono state pari a 125.2 mm ovvero



(a) Cumulata di pioggia registrata nel 2014 dalla stazione Onset Hobo U30 (Hobo)



(b) Confronto tra i valori medi mensili di precipitazione per Bologna e i dati misurati nel 2014 dalla stazione meteo Hobo

FIGURA 4.5: Cumulata di pioggia registrata nel 2014 dalla stazione Onset Hobo U30 (Hobo) e confronto tra i valori medi mensili di precipitazione per Bologna e i dati misurati nel 2014 dalla stazione meteo Hobo.

circa 3 volte il valore medio (43 mm) registrato dal 1935 ad oggi. L'unica precipitazione di tipo nevoso è stata registrata a febbraio 2015.

4.2.2 Temperatura dell'aria

Durante il corso del 2014 la temperatura dell'aria, misurata dalla stazione Hobo per mezzo del sensore "Temperature/RH Smart Sensor (S-THB-M00x)" a 1.5 metri dal piano campagna (il tetto è posto a 6 m dal piano stradale), è variata mediamente tra 5 °C ed i 35 °C. La Fig. 4.6 mostra l'andamento delle temperature giornaliere massime e minime rispettivamente in rosso e blu, e le temperature medie in grigio, le bande rappresentano i percentili dal 25 al 75%. La stagione calda del 2014, con temperature maggiori dei 25 °C inizia verso la metà di Maggio e termina verso la metà di Ottobre. La

temperatura massima si registra il 19 Luglio ed è pari a 41.7 °C. Il grafico riporta sia le temperature invernali del 2013/2014 che quelle del 2014/2015. Mediamente l'inverno appena trascorso è stato leggermente più freddo del precedente e le temperature minime a partire dal 30 Dicembre sovente sono andate al di sotto degli 0 °C. Le temperature invernali sono miti nei mesi di Gennaio e Febbraio mentre risultano significativamente più rigide nel mese di Dicembre in cui, il 30 Dicembre si registra anche la temperatura minima assoluta dell'anno pari a -3.8 °C.

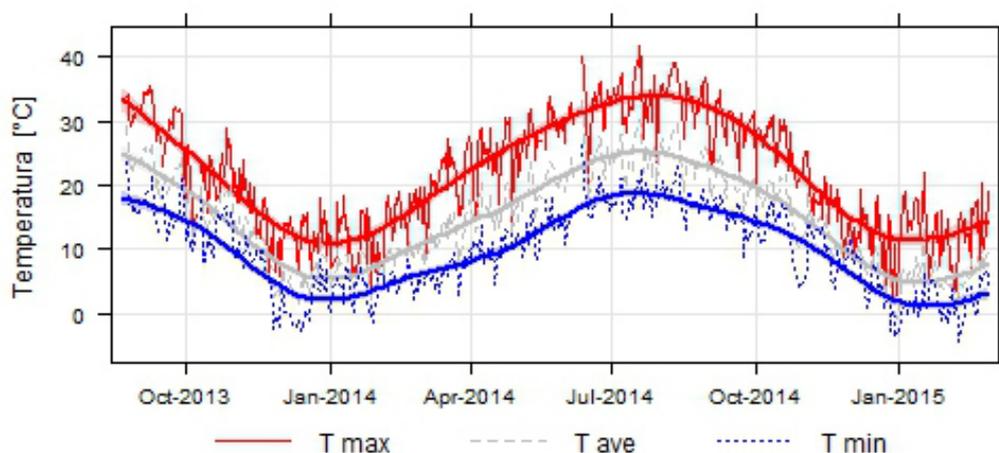


FIGURA 4.6: Temperature giornaliere: minima (linea blu), massima (linea rossa) e media (linea grigia) registrate durante il monitoraggio dalla stazione Hobo (le bande rappresentano i percentili dal 25 al 75%).

4.2.3 Temperatura di rugiada e Umidità relativa

La misurazione in continuo di questi 2 parametri avviene mediante l'utilizzo dell'igrometro Temperature/RH Smart Sensor (S-THB-M00x) direttamente connesso con la stazione Hobo. L'igrometro (Eagleson, 1970) è un dispositivo che contiene al suo interno due termometri, ventilati artificialmente, di cui uno è a bulbo secco e l'altro a bulbo bagnato. La differenza di temperatura, in gradi, tra le letture che vengono effettuate viene chiamata "wet-bulb depression" ed è usualmente utilizzata per la determinazione della temperatura di rugiada, dell'umidità relativa e della pressione di vapore.

Con il termine temperatura di rugiada (dew point) si intende la temperatura alla quale, a pressione costante, l'aria (più precisamente la miscela aria-vapore) diventa satura di vapore acqueo. In Fig. 4.7 vengono mostrati i valori medi giornalieri della temperatura di rugiada (linea verde) e della temperatura dell'aria (linea blu). L'umidità relativa (relative humidity, RH) esprime il rapporto tra la densità del vapore contenuto in una

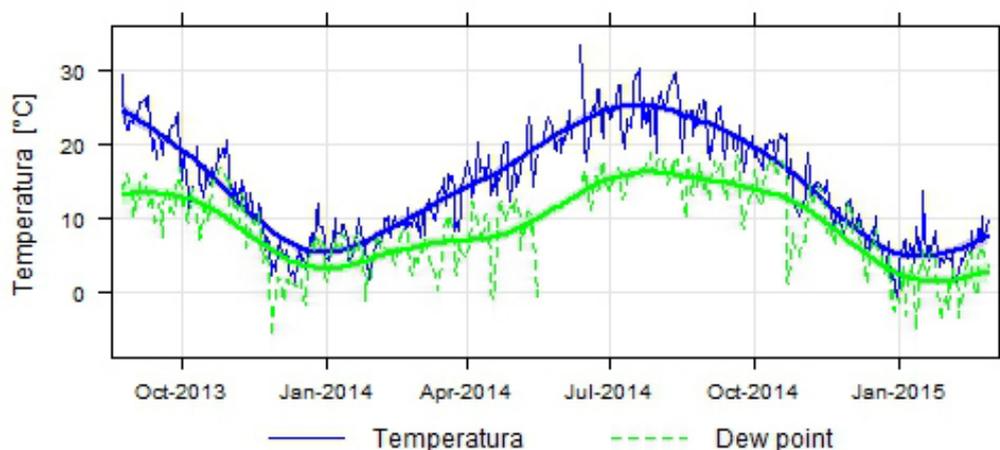


FIGURA 4.7: Valori medi giornalieri della temperatura di rugiada (linea verde) e della temperatura dell'aria (linea blu) registrate dalla stazione Hobo (le bande rappresentano i percentili dal 25 al 75%).

miscela ad una data temperatura e la densità del vapore saturo alla stessa temperatura. Per definizione è espresso in percentuale. Un umidità relativa pari al 100% indica che il miscuglio gassoso contiene la massima quantità di umidità possibile per le date condizioni di temperatura e pressione, e non esistono valori superiori (a meno di sovraturazioni). L'umidità relativa è soggetta sia a variazioni cicliche diurne che variazioni stagionali sul lungo periodo. Generalmente la variazione giornaliera varia tra circa il 58% (mediamente umido) al 95% fortemente umido. Durante il corso dell'anno invece, i valori medi giornalieri di umidità (Fig. 4.8) raramente scendono al di sotto del 40% (comfort zone). Durante il periodo estivo l'umidità è mediamente intorno al 60% con valori minimi registrati tra la fine del mese di maggio e l'inizio del mese di giugno. I periodi più umidi si registrano nei mesi di novembre-gennaio in cui per diversi giorni l'umidità relativa dell'aria supera il 95%. Il grafico (Fig. 4.8) evidenzia anche come la stagione invernale 2013/2014 è stata caratterizzata da giornate mediamente più umide.

4.2.4 Radiazione Solare

L'intensità e la durata della radiazione solare globale è stata misurata mediante il piranometro Silicon Pyranometer Smart Sensor (Part S-LIB-M003) connesso alla stazione Hobo. La radiazione solare è una grandezza di notevole interesse climatologico ed agrometeorologico, usualmente è utilizzata anche in applicazioni modellistiche di simulazione dei processi di fotosintesi e del bilancio idrico (Pammolli and Marletto, 2005). La Fig. 4.9 mostra la radiazione solare massima e media giornaliera registrata dallo

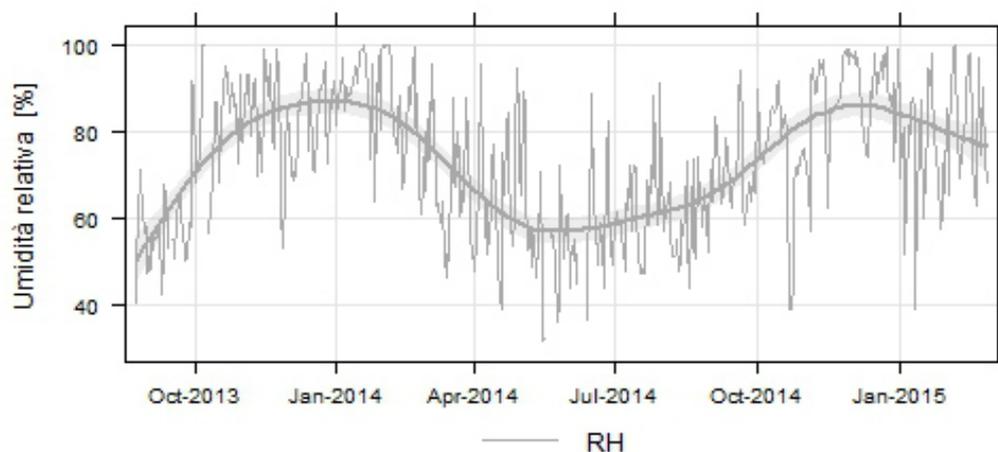


FIGURA 4.8: Valori medi giornalieri dell'umidità relativa (le bande rappresentano i percentili dal 25 al 75%).

strumento durante il periodo di monitoraggio.

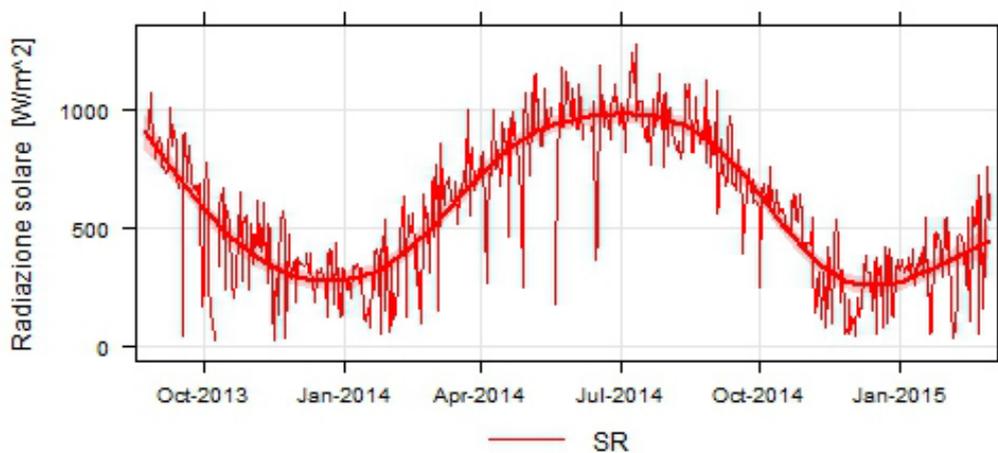


FIGURA 4.9: Valori medi giornalieri della radiazione solare (le bande rappresentano i percentili dal 25 al 75%).

4.2.5 Vento

Il vento è un parametro molto importante, capace di influenzare diversi fenomeni quali la vita dei microrganismi, i processi evapotraspirativi delle piante e secondo Berndtsson ([Berndtsson, 2010](#)) può influenzare anche la ritenzione di un tetto verde. Il vento usualmente viene caratterizzato attraverso due parametri che sono la velocità in m/s

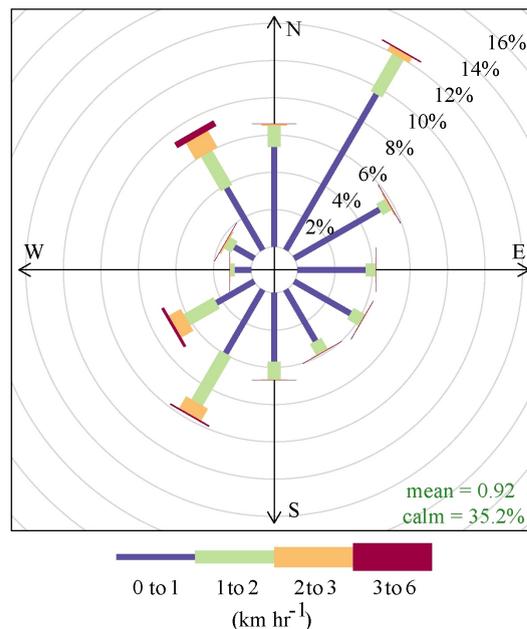


FIGURA 4.10: Rosa dei venti registrati dalla stazione Hobo nel 2014

e la direzione. La velocità del vento aumenta all'aumentare dell'altezza alla quale viene misurata e tende ad essere pari a zero sulla superficie terrestre. La direzione può variare nel range 0-360°. La stazione Hobo è in grado di memorizzare i dati di direzione, intensità e le raffiche mediante l'utilizzo del sensore S-WSA-M003 e del sensore S-WDA-M003 prodotti dalla Onset. La rosa dei venti rappresentata in 4.2.5 descrive la frequenza temporale % in cui i venti spirano con una certa velocità ed un certo angolo. La lunghezza dei rettangolini colorati è proporzionale alla frequenza mentre il colore varia in funzione dell'intensità. L'analisi della frequenza ed intensità dei dati annuali di vento evidenzia come il sito sia soggetto prevalentemente a "venti regnanti" (più persistenti e frequenti) di modesta intensità provenienti da NE mentre "venti dominanti" (quelli caratterizzati da classi di velocità più elevate) provengono da NW. Venti con minore frequenza ma con intensità non trascurabili provengono anche da SW. Da sottolineare comunque che i giorni con venti deboli o assenti (le cosiddette calme) durante l'anno sono stati pari al 35.2%. Nella stagione invernale (Fig. 4.2.5a) sia i "venti regnanti" che i "dominanti" provengono dal versante NE con un'incidenza delle calme pari al 38.5%. Nella stagione primaverile (Fig. 4.2.5b) la frequenza dei venti è abbastanza equilibrata rispetto alle direzioni, tuttavia i venti provenienti da NW sono caratterizzati dalle intensità più alte. Durante il periodo estivo (Fig. 4.2.5c) i venti rispecchiano la situazione primaverile ma con intensità minori. In questa stagione l'incidenza delle calme è minore rispetto al periodo invernale infatti sono pari al 27%. Nel periodo autunnale (Fig. 4.2.5 d) si confermano venti di intensità variabile provenienti prevalentemente da NE e da SW, minimi i contributi dei venti provenienti da NW. Le calme durante questa stagione raggiungono l'incidenza maggiore arrivando al 43.5%.

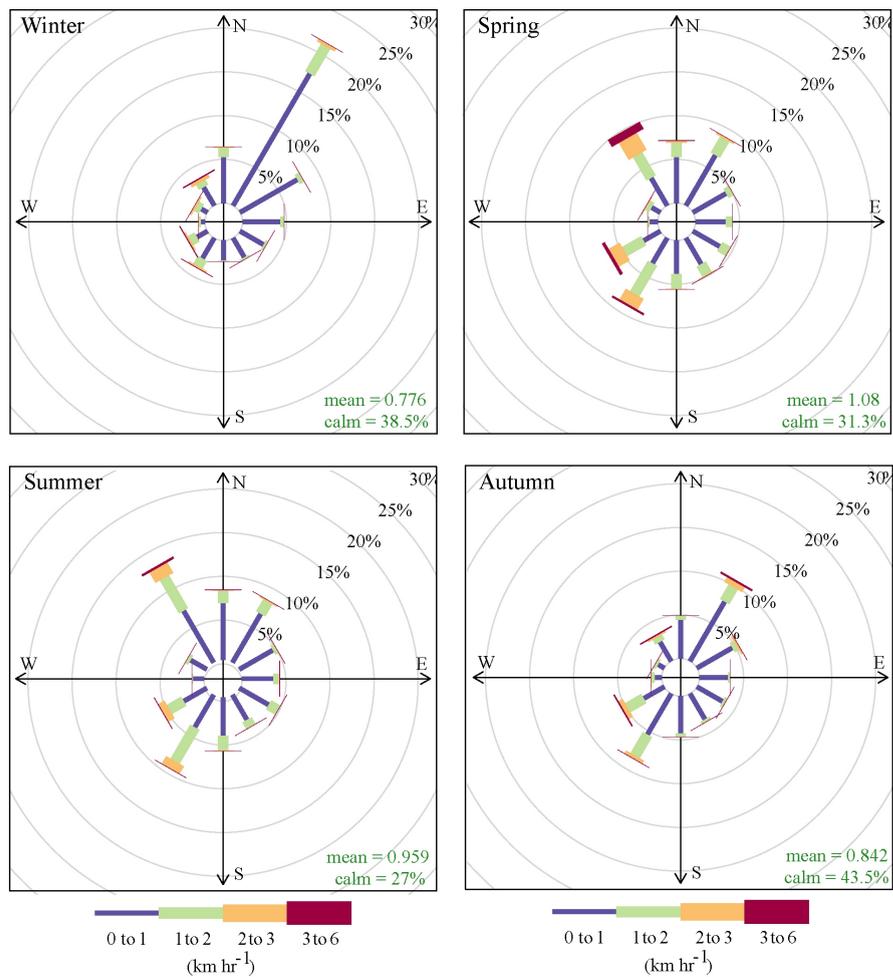


FIGURA 4.11: Andamento stagionale dei venti: a) inverno, b) primavera, c) estate, d) autunno.

4.3 Osservazioni idrologiche

In questa sezione verranno mostrati i risultati della campagna di monitoraggio inerenti la risposta idrologica dei 3 plots analizzati con lo scopo di: 1) colmare le lacune di conoscenza inerenti la capacità dei tetti verdi di trattenere acqua, 2) effettuare un'analisi comparativa del comportamento delle due famiglie di specie vegetali posizionate sul Sedum Roof e sul Native Roof.

4.3.1 Revisione della lettura scientifica

La ritenzione di un tetto verde, ovvero il volume di acqua che viene trattenuto dal pacchetto multistrato rispetto al volume di precipitazione, è il parametro maggiormente investigato dalla letteratura scientifica internazionale e viene considerato il migliore indicatore delle prestazioni idrologiche di un tetto verde. La ritenzione viene generalmente espressa in forma percentuale come:

$$\frac{V_p - V_d}{V_p} * 100 \quad (4.1)$$

in cui V_p rappresenta il volume affluito (precipitazione) e V_d il volume defluito (runoff) in un dato intervallo di tempo. L'attenuazione ed il ritardo del picco dell'idrogramma di piena del deflusso rispetto ai corrispondenti valori di precipitazione rappresentano gli altri indicatori prestazionali di un tetto verde. La letteratura scientifica internazionale fornisce importanti report ([Berndtsson, 2010](#); [Carson et al., 2013](#); [Palla et al., 2010b](#); [Razzaghmanesh et al., 2014](#); [Stovin et al., 2012](#); [Wong and Jim, 2014](#)) che consentono di ottenere una rapida visione delle prestazioni dei tetti verdi in relazione alle loro caratteristiche costruttive (pendenza del tetto, altezza e tipologia del substrato, vegetazione), al clima e alla durata del periodo di osservazione. Nella stesura di questi report alcuni studi ([Berndtsson, 2010](#)) trascurano la descrizione della tipologia di campo prove utilizzato (tetto verde in scala reale o modello fisico) fattore che, come evidenziato da [Carson et al. \(2013\)](#) è invece molto rilevante.

Nella presente revisione, la letteratura scientifica verrà suddivisa in due parti; nella prima parte verranno descritti brevemente i risultati sperimentali ottenuti su modelli fisici in scala ridotta (pilot roof o test bed) di tetti verdi di tipo intensivo ed estensivo, nella seconda parte invece, verranno descritti i risultati di sperimentazioni condotte su tetti verdi in scala reale (full scale green roof).

La ritenzione stimata mediante l'utilizzo di modelli fisici in scala ridotta di tetti verdi di

tipo estensivo può variare dal 30 al 86% (Getter et al., 2007; Morgan et al., 2013; Nardini et al., 2012; Schroll et al., 2011; Stovin et al., 2012; VanWoert et al., 2005). Questi studi, realizzati utilizzando dei modelli fisici caratterizzati da bacini drenanti con un'area variabile dai 0.37 ai 12 m^2 , dimostrano che la ritenzione aumenta all'aumentare dello spessore del substrato (VanWoert et al., 2005) e al decrescere della pendenza (Getter et al., 2007; VanWoert et al., 2005). La ritenzione non è da considerarsi costante durante il corso dell'anno ma varia in funzione del clima, Schroll et al. (2011) confrontano le performance in diversi stagioni dell'anno di tre plots caratterizzati da: nessuna vegetazione, una vegetazione media e una vegetazione standard in una configurazione di tipo estensivo; dimostrando che nei periodi invernali l'influenza della vegetazione è minima mentre nei periodi estivi a causa dell'accentuarsi dei processi evapotraspirativi diventa preponderante. Stovin et al. (2012), effettuando il monitoraggio in continuo di modelli fisici di circa 3 m^2 in clima continentale, affermano che l'utilizzo di modelli in scala ridotta determina la sottostima dell'attenuazione e del ritardo del picco di deflusso ma che non si ha un'interferenza con la stima della ritenzione del tetto in quanto quest'ultima è una funzione dello spessore e delle caratteristiche del substrato. Le affermazioni di Stovin et al. (2012) non sono condivise da Carson et al. (2013) che evidenziano come l'assenza di zone non vegetate nei modelli fisici (usualmente presenti nei tetti verdi reali per consentire il dislocamento di apparecchiature di servizio per l'edificio o per realizzare i camminamenti) determina un'incertezza nella comparazione delle performance idrologiche di una configurazione di tetto verde costruita su modello fisico rispetto alla stessa configurazione in scala reale. Carson et al. (2013) presentano un'interessante revisione contenente le caratteristiche geometriche principali, la durata delle osservazioni ed i risultati di ricerche sperimentali condotte sui tetti verdi in scala reale in diversi paesi. Tale revisione è stata, schematizzata in tabella 4.1 ed è stata perfezionata ed arricchita con le informazioni derivanti da studi più recenti. I 18 manoscritti analizzati presentano i risultati di studi condotti in tetti verdi reali con superfici dai 13 ai 7000 m^2 , spessori del substrato variabili nell'intervallo 50-200 mm e condizioni climatiche molto differenti. I valori di ritenzione misurati sono molto vari e oscillano dal 12 al 76.4% con un valore medio pari al 47.8 %. La ritenzione di un tetto, sia esso un modello in scala ridotta o un modello in scala reale è direttamente connessa alla definizione di evento pluviometrico. In letteratura tale definizione non è univoca ma è lasciata al libero arbitrio degli autori. Stovin et al. (2012) sottolineano infatti come, alla riduzione del tempo secco (ADWT) utilizzato per la definizione di un evento corrisponde una riduzione della ritenzione del tetto. Al contrario, aumentando l'ADWT che definisce l'evento, si corre il rischio che i piccoli eventi vengano inglobati negli eventi vicini. La conseguenza sarebbe che, molti eventi con ritenzione pari al 100% verrebbero eliminati, e dunque la ritenzione complessiva andrebbe a ridursi.

Carson et al. (2013) evidenziano come vi sia la necessità di uniformare la letteratura

Articolo	Area Geografica	Periodo	Area drenata [m^2]	Num. eventi	Spessore substrato [mm]	Ritenzione [%]
Berghage et al. (2009)	Chicago	8 / 07-7 / 09	7000	106	76	74
Berkompas et al. (2008)	Seattle, WA	2 / 07-12 / 07	743	NA	150	30.5
	Seattle, WA	4 / 07-6 / 07	1860	NA	100-125	33
	Seattle, WA	10 / 07-12 / 07	80	9	150	17.1
Bliss et al. (2009)	Pittsburg, PA	8 / 06-1 / 07	330	13	140	21.8
Connelly et al. (2005)	Vancouver, Canada	1 / 05-12 / 05	33	NA	75	29
	Vancouver, Canada	1 / 05-12 / 05	33	NA	150	26
Gregoire and Clausen (2011)	Storrs, CT	12 / 09-2 / 10	307	N	102	51.4
Hathaway et al. (2008)	Goldsboro, NC	4 / 03-6 / 04	35	NA	75	64
Hutchinson et al. (2003)	Portland, OR	1 / 02-4 / 03	240	NA	100-125	69
Kurtz Tim (2008)	Portland, OR	5 / 02-6 / 08	246	NA	125	56
	Portland, OR	3 / 07-6 / 08	465	NA	75	64
	Toronto, Canada	3 / 03-11 / 04	200	NA	75	57
Liu and Minor (2005)	Toronto, Canada	4 / 03-11 / 04	200	NA	100	57
	Goldsboro, NC	4 / 03-9 / 04	35	67	75	63
Moran et al. (2005)	Raleigh, NC	7 / 04-9 / 04	65	13	100	55
	Genova, Italy	5 / 07-6 / 08	170	19	200	51.8
Palla et al. (2010a)	Genova, Italy	9 / 08-12 / 08	170	10	200	14.9
	Portland, OR	10 / 04-4 / 07	290	NA	100-150	12
Spolek (2008)	Portland, OR	10 / 04-4 / 07	280	NA	100-150	17
	Portland, OR	1 / 05-10 / 07	500	NA	150	25
	Tartu, Estonia	8 / 04-9 / 04	120	3	100	19.6
Voyde et al. (2010a)	Auckland, NZ	10 / 08-10 / 09	41	91	50	66
	Auckland, NZ	10 / 08-10 / 09	13	91	50	66
	Auckland, NZ	10 / 08-10 / 09	46	91	70	66
	Auckland, NZ	10 / 08-10 / 09	45	91	70	66
	Auckland, NZ	10 / 08-10 / 09	12	91	70	66
	Auckland, NZ	10 / 08-10 / 09	38	91	50	66
	Auckland, NZ	10 / 08-10 / 09	38	91	50	66
Carson et al. (2013)	Newyork, NY	06/11-06/12	310	74	32	36
	Newyork, NY	06/11-06/13	390	108	100-200	47
	Newyork, NY	06/11-04/14	940	61	100	61
Speak et al. (2013)	Manchester, UK	09/11-10/12	408	254	170	65.7
Hakimdavar et al. (2014)	Newyork, NY	08/11-1/12	310	113	32	50.6
	Newyork, NY	8/11-06/12	99	110	32	61.3
Yang et al. (2015)	Beijing, China	04/12-7/12	120	13	15	76.4

TABELLA 4.1: Sommario degli studi inerenti le prestazioni idrologiche di tetti verdi in scala reale. Le colonne da sinistra a destra contengono gli autori e l'anno di pubblicazione, area geografica, periodo di monitoraggio, area caso studio, numero di eventi indipendenti identificati, spessore del substrato in mm , ritenzione media espressa come valore percentuale. "NA" è stato utilizzato per sopperire all'assenza di informazione.

fornendo non solo una definizione univoca di evento meteorico ma anche il numero di eventi considerati nello studio, la stagione e l'intensità dell'evento. [Carter and Ramussen \(2006\)](#) trovarono una relazione inversa tra intensità di pioggia e percentuale di pioggia trattenuta, ovvero, maggiore è l'intensità di pioggia e minore è la ritenzione. Questa affermazione negli anni ha trovato conferma anche in numerosi altri studi ([Carson et al., 2013](#); [Fioretti et al., 2010](#); [Hakimdavar et al., 2014](#); [Speak et al., 2013](#); [Stovin et al., 2013, 2012](#)). [Stovin et al. \(2012\)](#) ritengono che la caratterizzazione dell'evento deve essere completata mediante la definizione del suo tempo di ritorno. [Berndtson \(2010\)](#), nell'effettuare la revisione dei fattori che influenzano le prestazioni dei tetti verdi evidenzia che, gli studi che forniscono informazioni inerenti le proprietà fisiche del substrato sono un numero limitato. Fortunatamente negli ultimi anni si è avuta un'inversione di tendenza per cui quasi tutti gli studi più recenti includono tali proprietà ([Berretta et al., 2014a](#); [Carson et al., 2013](#); [Fassman et al., 2013](#); [Hakimdavar et al., 2014](#); [Palla et al., 2008](#); [Stovin, 2010](#); [Stovin et al., 2012, ?](#); [Volder and Dvorak, 2014](#)), ciò nonostante rimangono ancora un numero limitato gli studi che correlano il contenuto d'acqua volumetrico (θ) alla ritenzione. Si ritiene che la conoscenza delle proprietà fisiche del substrato costituisca una *conditio sine qua non* alla stima e alla previsione dei deflussi. Durante un evento meteorico i meccanismi chiave che regolano i processi idrologici di un tetto verde sono: (1) la cattura della pioggia da parte della vegetazione e (2) il processo di infiltrazione e accumulo nel substrato e nel drenaggio. Il volume di acqua che il sistema non riesce a trattenere costituisce il deflusso ([Stovin et al., 2012](#)). I volumi ritenuti nel substrato invece, col tempo si disperdono in atmosfera a causa dei processi evapotraspirativi. Come evidenziato da [Yang et al. \(2015\)](#) le cause che generano il deflusso sono essenzialmente due: saturazione del substrato (*saturation-excess*); 2) superamento della capacità di infiltrazione (*infiltration-excess*). Il primo tipo di deflusso si genera in occasione di precipitazioni con modesta intensità per cui si ha deflusso per raggiungimento della capacità di campo del terreno; il secondo tipo di deflusso si genera quando l'intensità di precipitazione è superiore alla conducibilità idraulica del suolo. Fatte queste premesse [Yang et al. \(2015\)](#) individuano 4 casi corrispondenti ad altrettante combinazioni di condizioni per le quali si può generare il deflusso. La conseguenza diretta degli scenari proposti è che per la prima volta gli eventi vengono caratterizzati oltre che con il dato relativo all'intensità di precipitazione, come precedentemente effettuato da altri autori ([Carson et al., 2013](#); [Fassman et al., 2013](#); [Hakimdavar et al., 2014](#); [Stovin et al., 2012](#)), anche con il contenuto volumetrico iniziale in acqua. Come conclusione del loro lavoro sviluppano un modello empirico che stima il deflusso in funzione del valore di umidità del suolo misurato immediatamente prima dell'inizio della precipitazione.

4.3.2 Metodo

I dati di precipitazione e deflusso, raccolti in continuo da Ottobre 2013 a Dicembre 2014 sono stati analizzati seguendo la procedura indicata da [Carson et al. \(2013\)](#) con i quali, vi sono in comune anche le caratteristiche della stazione meteo Onset Hobo U30 (Hobo) e i sensori Senix TSPC-30S1 (sviluppati presso i laboratori della Columbia University ed adattati al caso studio italiano) per la misurazione del deflusso. La scelta di standardizzare le procedure di acquisizione del dato e la loro elaborazione deriva dall'idea che ciò possa facilitare la comparazione di dataset provenienti da diversi campi prova. Le acquisizioni in continuo sono dunque state scomposte in eventi singoli utilizzando una versione modificata dello standard definito dalla "National Oceanic and Atmospheric Administration" statunitense. In questo studio, come anche in [Carson et al. \(2013\)](#), un evento pluviometrico inizia quando la pioggia viene registrata dal pluviometro e termina quando si verifica una delle seguenti circostanze: assenza di drenaggio o assenza di precipitazione per almeno 6 ore. Il passo successivo all'individuazione dei singoli eventi è la verifica che essi rispettino i criteri di accettabilità. I requisiti minimi di non accettabilità individuati da [Carson et al. \(2013\)](#) sono i seguenti:

- (1) Il volume cumulato defluito è superiore al volume cumulato affluito. Questo errore, molto frequente, accade quando foglie, insetti o altro materiale occludono lo stramazzo compromettendo la misura di livello del sensore.
- (2) La precipitazione cade sotto forma di neve. Il processo di deflusso conseguente allo scioglimento della neve differisce da quello generato in occasione di eventi pluviometrici, si è dunque deciso di scartare questi eventi.
- (3) Il picco di intensità pluviometrica genera un'altezza della lama d'acqua all'interno dello strumento superiore al 90% dell'altezza dello stramazzo. Le portate che eccedono questo limite determinano una forte turbolenza dentro lo strumento per cui le letture non risultano affidabili.
- (4) Calo di tensione durante l'evento per cui gli strumenti non vengono raggiunti da una potenza tale da garantire l'affidabilità della lettura.

I criteri forniti da [Carson et al. \(2013\)](#) sono stati ulteriormente affinati mediante l'introduzione di due ulteriori vincoli:

- (5) L'intensità massima di precipitazione durante l'evento deve essere maggiore della intensità massima di deflusso.

- (6) La cumulata di precipitazione registrata durante un evento deve essere superiore a 0.2 mm . Questo criterio è legato alla precisione del pluviometro il quale effettua una basculata ogni volta che ha immagazzinato 0.2 mm di precipitazione. La necessità di eliminare questo tipo di eventi deriva dal fatto che non è possibile determinare il tempo durante il quale si è generato tale accumulo.

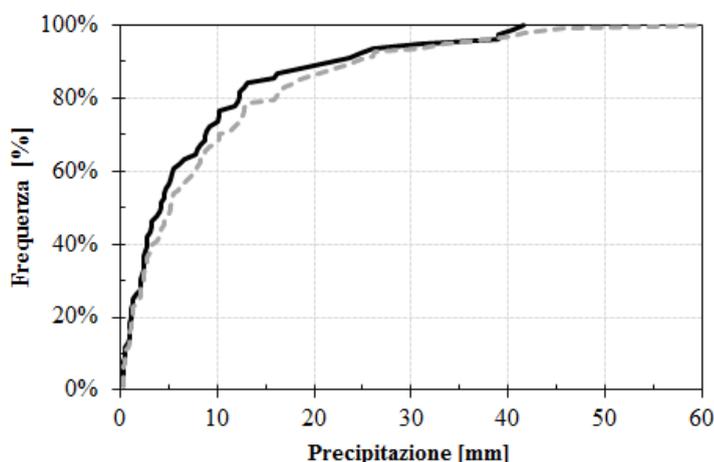
Durante i 15 mesi di monitoraggio non si sono registrati eventi nevosi né cali di tensione. L'errore più frequentemente riscontrato è stato causato dalla parziale occlusione degli stramazzi ad opera di foglie, insetti ed altro materiale e la conseguente erronea lettura del sensore che porta ad una sovrastima dei volumi defluiti. Individuati i singoli eventi privi di errore si è proceduto con la caratterizzazione degli stessi individuando la pioggia cumulata, il tempo secco antecedente (ADWT), la massima intensità registrata, ed infine, laddove possibile, il contenuto di umidità del suolo prima ed al termine della precipitazione.

4.3.3 Risultati

Nel presente paragrafo verranno descritti i risultati ottenuti dai 15 mesi di osservazioni. Si ritiene importante sottolineare come, a causa della definizione stessa di evento pluviometrico, i 3 plots sperimentali, sebbene soggetti alla stessa precipitazione possano originare eventi pluviometri distinti. In altre parole, poichè un evento pluviometrico *“inizia quando la pioggia viene registrata dal pluviometro e termina quando si verifica una delle seguenti circostanze: assenza di drenaggio o assenza di precipitazione per almeno 6 ore”* può avvenire che l'arrestarsi del drenaggio nei 3 plots non sia contemporaneo. Ciò è principalmente da attribuirsi alle caratteristiche dei 3 plots che sono stati progettati proprio per mettere in luce queste differenze. Ci si aspetta infatti che il Reference Roof (RR), corrispondente ad una superficie impermeabile di riferimento, sia caratterizzato da un deflusso che si esaurisce poco dopo l'evento meteorico mentre gli altri 2 plots (SR e NR) effettuino una laminazione dell'idrogramma di piena e di conseguenza dilatino il lag temporale esistente tra la fine della precipitazione e la fine del deflusso. La risposta idrologica delle 3 parcelle analizzate (SR, NR, RR) verrà analizzata separatamente ed infine verranno tratte le relative conclusioni. I dati di precipitazione e di deflusso registrati per il SR ed NR plot hanno consentito l'individuazione di 102 e 105 eventi indipendenti. I criteri di accettazione sopracitati hanno determinato l'esclusione rispettivamente di 27 e 12 eventi per i quali si sono riscontrati errori di diversa origine. In totale gli eventi utilizzabili per le seguenti considerazioni sono 75 per il plot SR e 93 per il plot NR. La tabella 4.2 fornisce uno schema riassuntivo degli eventi considerati in termini di numero di eventi per intervallo di altezza di pioggia e di stagione. Nelle

pagine seguenti si utilizzerà il termine "eventi" includendo unicamente gli eventi privi di errore. Le altezze di pioggia caratteristiche degli eventi variano nell'intervallo 0.4-41.6 *mm* per il plot SR e da 0.4-61.2 *mm* per il plot NR mentre i deflussi normalizzati variano rispettivamente nei range 0-35.9 *mm* e 0-58.32 *mm*. In Fig. 4.12 vengono confrontate le distribuzioni percentuali delle altezze di pioggia per le due serie di eventi. Si ritiene importante sottolineare come le precipitazioni registrate durante il periodo di monitoraggio siano caratterizzate in prevalenza da modeste altezze, infatti circa il 75% degli eventi è caratterizzato da un'altezza di pioggia pari o inferiore ai 10 *mm*.

La variabilità stagionale delle altezze di pioggia è stata rappresentata mediante i box-plots in Fig. 4.13 in cui la linea nera rappresenta la media degli eventi per quella stagione, i limiti della scatola il 25-esimo e del 75-esimo percentile, i baffi il minimo ed il massimo ed i punti gli outlier. Le altezze di precipitazione sono state omogenee durante il corso dell'anno mentre gli eventi con intensità maggiori si sono registrati durante il periodo estivo ed in particolare nei mesi di Giugno e Luglio.



(a) Frequenza cumulata delle altezze di precipitazione

FIGURA 4.12: Frequenze cumulate delle altezze di precipitazione degli eventi analizzati: in nero per il plot SR ed in grigio per il plot NR

La Fig. 4.20a e Fig. 4.20c mostrano, come ci si aspettava, una forte correlazione tra precipitazione e deflusso. Il grafici, per entrambi i plot evidenziano che il deflusso tende ad essere un 0-30 *mm* in meno rispetto alla precipitazione. Il volume di ritenzione dipende dalla capacità di ritenzione residua al momento dell'inizio dell'evento meteorico. La Fig. 4.20b mostra lo stesso fenomeno in termini di ritenzione %. La ritenzione percentuale risulta essere inversamente proporzionale all'altezza di precipitazione, questo perchè una volta che il pacchetto giunge a saturazione non è più in grado nè di laminare ne di ritardare l'idrogramma di piena e conseguentemente la ritenzione è nulla.

Basandosi sull'assunzione che all'aumentare del tempo secco il substrato ripristina

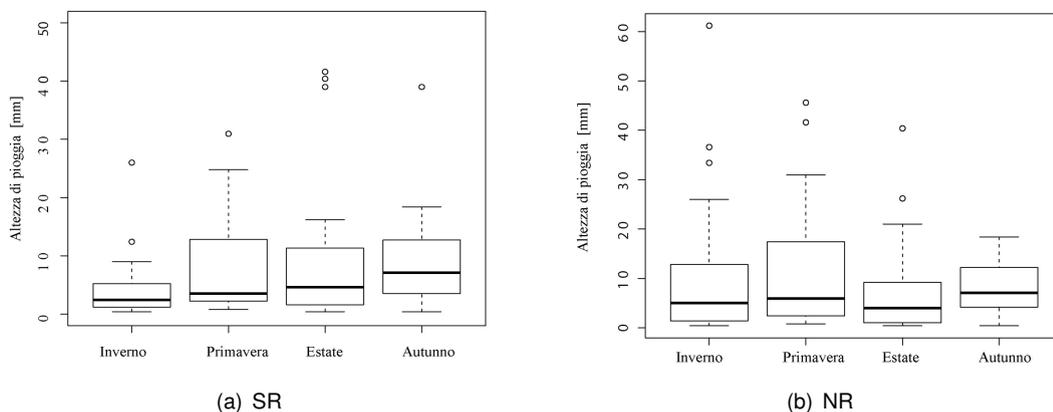
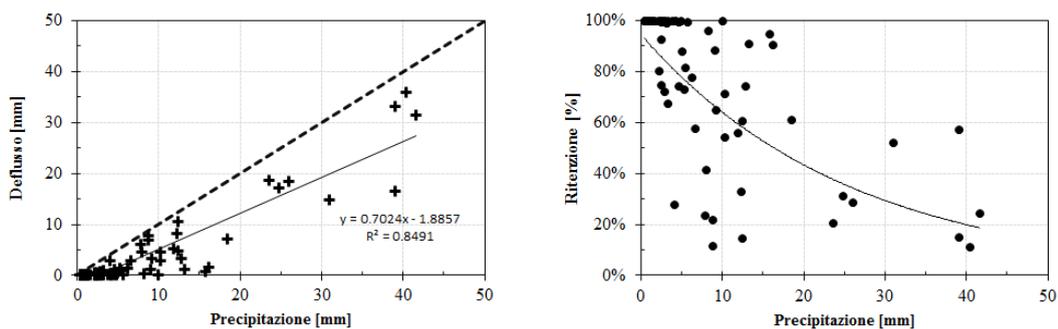
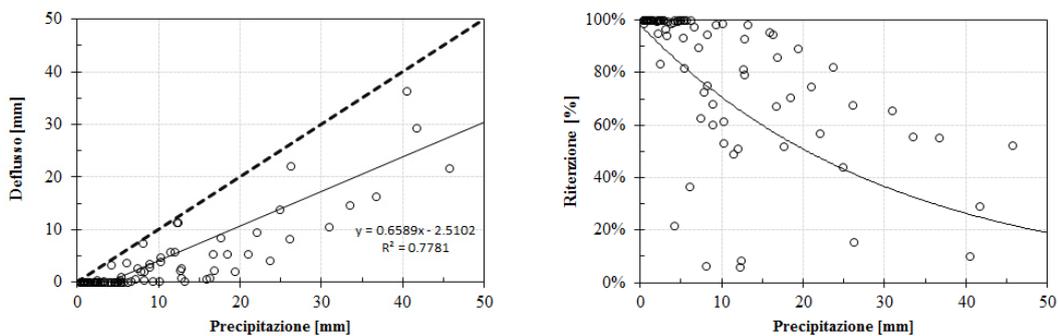


FIGURA 4.13: Boxplot rappresentanti la variabilità stagionale delle altezze di pioggia degli eventi misurati per i plot SR e NR



(a) Regressione lineare tra precipitazione e deflusso per il plot SR. La linea tratteggiata corrisponde alla linea di uguaglianza.

(b) Relazione tra precipitazione e ritenzione % per il plot SR. La linea evidenzia come all'aumentare dell'altezza di pioggia diminuisca la ritenzione del tetto verde.



(c) Regressione lineare tra precipitazione e deflusso per il plot NR. La linea tratteggiata corrisponde alla linea di uguaglianza.

(d) Relazione tra precipitazione e ritenzione % per il plot NR. La linea evidenzia come all'aumentare dell'altezza di pioggia diminuisca la ritenzione del tetto verde.

FIGURA 4.14: Regressioni tra afflussi e deflusso nel plot SR e NR.

	SR	NR
Data inizio	Oct-13	Oct-13
Data fine	Dec-14	Dec-14
Eventi totali	102	105
Eventi utilizzabili	75	93
Eventi (0-10 mm)	56	62
Eventi (10-20 mm)	11	18
Eventi (20-30 mm)	3	6
Eventi (30+ mm)	5	7
Eventi invernali	26	33
Eventi primaverili	14	24
Eventi estivi	19	21
Eventi autunnali	16	14

TABELLA 4.2: Caratteristiche riassuntive eventi validi per il plot SR ed NR. Il numero di eventi per ogni stagione viene fornito per identificare la distribuzione stagionale degli eventi

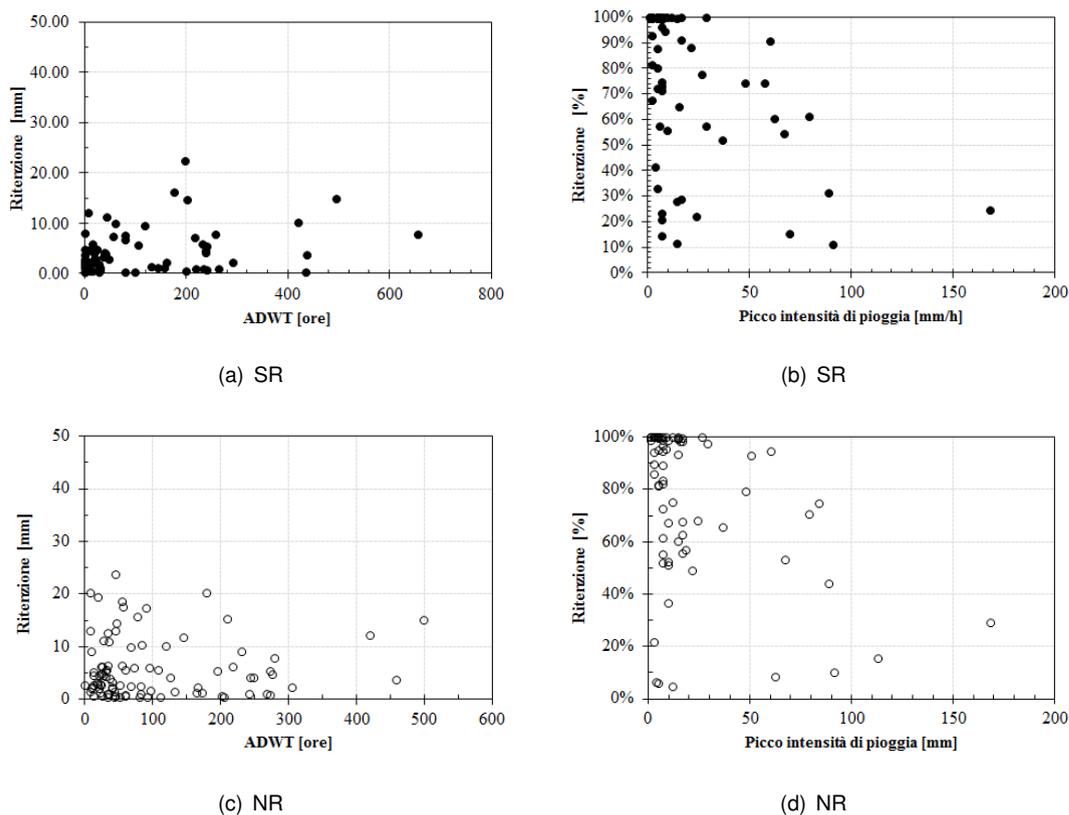


FIGURA 4.15: Plot di regressione di alcuni parametri chiave del processo afflussi/deflussi

gradualmente la sua capacità di ritenzione a causa dei processi evapotraspirativi, si è ipotizzata una possibile correlazione tra ADWT e ritenzione % (Fig. 4.15a e Fig. 4.15c). Il grafico mostra che i punti si dispongono su una nuvola molto sparsa senza un'evidente correlazione, sia per il plot SR che per il plot NR. Perseguendo nello scopo di investigare i parametri che maggiormente influenzano la ritenzione essa è stata graficata in funzione del picco di precipitazione (Fig. 4.20b). Il grafico mette in risalto come per intensità superiori ai 40 mm/h si assiste ad un decremento della ritenzione.

La precedente analisi statistica ha concesso la determinazione di una stretta correlazione tra afflussi e deflussi tuttavia si evidenzia come non consenta la determinazione dei parametri chiave operanti nei tetti verdi. In particolare, come evidenziato da [Stovin et al. \(2012\)](#), l'ADWT non risulta essere un buon predittore della ritenzione. Ciò dipende essenzialmente dal fatto che la capacità di ritenzione di un tetto verde dipende in particolar modo dal grado di saturazione del substrato nel momento in cui inizia la precipitazione. La massima capacità di ritenzione del substrato rappresenta il limite, raggiunto il quale, il suolo non è più in grado di trattenere acqua se soggetto alla forza di gravità. Questo limite, che prende il nome di capacità di campo è una costante idrologica del suolo. Per il substrato in analisi è pari a 0.35 (v/v). Ciò significa che, in linea di principio il substrato in oggetto è in grado di trattenere un massimo di 35 mm di precipitazione prima che si generi deflusso. Questa condizione è sempre vera a meno che l'intensità di precipitazione non sia tale che si abbia deflusso perchè la velocità con cui l'acqua si infiltra è superiore alla conducibilità idraulica del suolo. Alla luce di queste osservazioni è quindi evidente come il suolo abbia una capacità di ritenzione limite raggiunta la quale, indipendentemente dal tempo secco antecedente l'evento pluviometrico, non è in grado di ritenere un quantitativo superiore di precipitazione ed inizia il deflusso. Nonostante in letteratura siano presenti diverse relazioni empiriche che legano precipitazione e deflusso solo [Yang et al. \(2015\)](#) sviluppano un modello fisico in cui per la prima volta la variazione di contenuto di umidità nel suolo viene utilizzata per stimare il deflusso durante un evento. Il modello di ([Yang et al., 2015](#)) esprime il deflusso (R) come :

$$R = P - Z_r(\theta_s - \theta_m C) \quad (4.2)$$

in cui P rappresenta l'altezza di precipitazione, Z_r lo spessore del substrato, θ_s la capacità di campo (v/v), θ_m il contenuto volumetrico in acqua mediato lungo la verticale prima della precipitazione e C è un coefficiente di forma ottenibile per calibrazione del modello. [Yang et al. \(2015\)](#) effettuano due ipotesi di base che sono: (1) assenza di flusso laterale durante l'evento (ipotesi plausibile con limitate pendenze del tetto verde) e (2) trascurabilità dell'evapotraspirazione durante un evento pluviometrico. Il modello viene calibrato utilizzando il data set derivante da un tetto verde sperimentale di 120 m^2 collocato sulla sommità di un edificio del Campus Tsinghua a Pechino. L'esperimento

venne condotto da Aprile a Luglio 2012. Gli eventi con deflusso non nullo registrati (6) consentirono l'individuazione della seguente relazione lineare:

$$\frac{P - R}{Z} = 0.47 - 1.33 * \theta_m \quad (4.3)$$

In cui il valore di θ_s viene fissato pari a $0.47 \text{ m}^3/\text{m}^3$ sulla base di misurazioni puntuali effettuate alla fine dell'evento ma non mostrate tra i risultati e C , corrispondente al fattore di forma viene posto pari a 1.33. Il modello previsionale P-R basato sull'equazione 4.2 di Yang et al. (2015) è stato testato utilizzando i dati sperimentali raccolti per il plot SR per il quale, a partire dal mese di Giugno del 2014, sono disponibili oltre ai dati della stazione meteo e le misure del deflusso anche i dati di umidità del suolo misurati mediante una sonda capacitiva ECH_2O della Decagon. I dati della sonda, collocata al centro del plot SR, vengono acquisiti ogni secondo, mediati sui 5 minuti e successivamente memorizzati. Lo spessore del substrato z è stato posto pari a 100 mm. Il valore di θ_s calcolato sperimentalmente mediante il metodo WP4-T (descritto nel capitolo precedente) è stato posto pari a $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$. La tabella 4.3 riporta le caratteristiche principali dei 36 eventi registrati dal 01/06/2014 al 31/12/2014 che hanno superato i vincoli di accettabilità e per i quali è stato possibile effettuare una misurazione in continuo di precipitazione, deflusso e umidità del suolo sono 36. In accordo con Yang et al. (2015) sono stati scartati tutti gli eventi (15) durante i quali non si è generato alcun deflusso e quelli per i quali la sommatoria tra volume defluito e volume ritenuto è maggiore della precipitazione (8). La tabella 4.3 riporta le caratteristiche principali degli eventi, i valori di contenuto volumetrico del substrato riportati corrispondono al valore medio misurato nell'ora immediatamente prima dell'evento meteorico e quello medio dell'ora conseguente la fine dell'evento meteorico. La figura 4.16 mostra come il modello fisicamente basato di Yang et al. (2015) espresso mediante l'equazione 4.2 in cui i parametri θ_m , θ_s e C sono stati posti rispettivamente pari al valore di umidità registrato dalla sonda prima dell'evento, al valore di capacità di campo misurata in laboratorio ($0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$) ed a 1.0, ben si adatti al dataset sperimentale oggetto del presente studio. Il modello P-R di (Yang et al., 2015) tuttavia si basa sull'ipotesi che durante un evento meteorico si generi deflusso solo quando il substrato raggiunge la capacità di campo. Questa semplificazione tuttavia non è sempre vera come dimostrato dagli stessi (Yang et al., 2015) ed ulteriormente riscontrato nel dataset illustrato in 4.3. Ciò può essere spiegato con il fatto che un tetto verde in scala reale è spesso dotato di elementi accessori quali i camminamenti in ghiaia (Carson et al., 2013) o eventuali parti impermeabili che potrebbero causare deflusso nonostante il substrato non abbia raggiunto la capacità di campo. Partendo dall'equazione di bilancio idrologica seguente:

$$\Delta S = P - LE - R \quad (4.4)$$

Data	Precipitazione [mm]	ADWP [hours]	Max Intensità [mm/h]	Deflusso [mm]	Ritenzione [%]	θ_i [%]	θ_e [%]
14-06 2014 2:00	41.6	420.00	168	31.427	24.45	0.01	0.29
26-06 2014 12:00	40.4	239.25	91.2	35.895	11.15	0.10	0.30
29-06 2014 23:10	12.4	80.67	62.4	4.885	60.60	0.21	0.30
08-07 2014 3:10	8.8	218.33	14.4	7.784	11.54	0.07	0.15
14-07 2014 17:30	4	30.08	14.4	2.885	27.87	0.11	0.15
16-08 2014 9:00	9.2	231.00	15.6	3.235	64.84	0.06	0.16
01-09 2014 1:30	16.2	203.00	60	1.507	90.70	0.03	0.28
20-09 2014 4:35	39	15.83	69.6	33.065	15.22	0.23	0.23
01-10 2014 16:15	13.2	6.75	16.8	1.169	91.15	0.22	0.29
13-10 2014 17:25	18.4	42.83	79.2	7.167	61.05	0.23	0.29
14-10 2014 19:00	6.2	24.58	26.4	1.386	77.65	0.30	0.30
15-10 2014 7:20	2.8	12.00	4.8	0.782	72.06	0.30	0.30
05-11 2014 1:30	15.8	494.25	8.4	0.840	94.69	0.20	0.29
06-11 2014 7:35	5.4	15.17	2.4	0.996	81.55	0.29	0.30
10-11 2014 6:55	11.9	79.83	9.6	5.238	55.98	0.29	0.30
17-11 2014 9:25	12.2	41.08	4.8	8.171	33.02	0.33	0.35
05-12 2014 2:55	2.4	27.50	7.2	0.608	74.65	0.35	0.35
06-12 2014 22:45	8	38.08	3.6	4.680	41.50	0.35	0.35
16-12 2014 0:15	10.2	216.42	7.2	2.921	71.37	0.34	0.35
27-12 2014 15:20	8.2	257.83	7.2	0.321	96.08	0.35	0.35
28-12 2014 12:55	2.2	12.33	4.8	0.433	80.31	0.35	0.35

TABELLA 4.3: Caratteristiche riassuntive degli eventi con misura contemporanea di precipitazione, deflusso e umidità per il plot SR

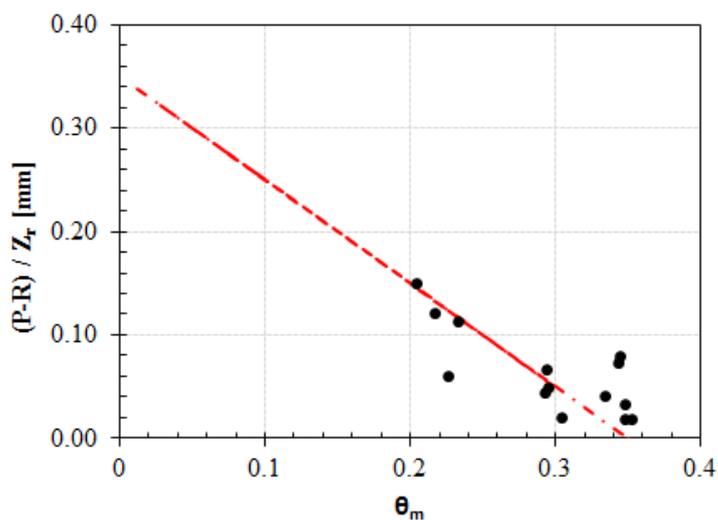


FIGURA 4.16: Data set sperimentale plot SR (punti) e modello proposto da [Yang et al. \(2015\)](#)(linea rossa)

in cui ΔS è la variazione di umidità del suolo determinata dalla precipitazione, P è la precipitazione, LE è l'evapotraspirazione ed R è il deflusso normalizzato rispetto all'area. Ipotizzando di trascurare il volume di acqua evapotraspirata durante l'evento e trascurando i flussi laterali in analogia con (Yang et al., 2015) l'equazione 4.5 diventa:

$$P = \Delta S + R \quad (4.5)$$

La variazione di umidità nel suolo integrata lungo la colonna costituente il substrato può essere espressa come: $\Delta S = \int_0^z (\theta_e - \theta_i) dz$, in cui Z è lo spessore del substrato e θ_e e θ_i sono i contenuti di umidità del substrato rispettivamente alla fine e all'inizio di Δt (durata precipitazione). La variazione di contenuto volumetrico in acqua integrata lungo la colonna può essere espressa come:

$$\Delta S = (\theta_e - \theta_i) * Z \quad (4.6)$$

Sostituendo l'equazione 4.6 in 4.5 otteniamo dunque che:

$$P = R + (\theta_e - \theta_i) * Z \quad (4.7)$$

Come si evince dalla Fig. 4.17 i punti sperimentali, dopo una perdita iniziale pari a

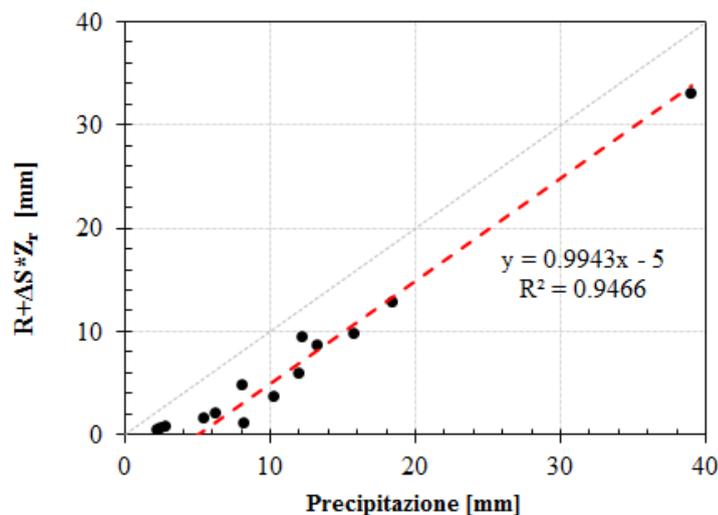


FIGURA 4.17: Regressione lineare tra la precipitazione P [mm] e il parametro $R + (\theta_e - \theta_i) * Z$

circa 5 mm, si dispongono lungo una retta con pendenza a 45°. I dati dunque evidenziano quanto ci si aspettava di osservare ovvero che al netto di una perdita iniziale pari mediamente a 5 mm esiste una relazione lineare tra la precipitazione P ed il parametro $R + (\theta_e - \theta_i) * Z$. La perdita iniziale è imputabile alla ritenzione operata da gli elementi che costituiscono il tetto verde ad esclusione del substrato come: l'elemento

di drenaggio Seic-MediDrain MD (capacità massima di ritenzione 3 l/m^2), il telo filtrante mediFilter MF-1, il feltro Seic MediPro MP 300) e la vegetazione. La vegetazione, oltre a trattenere una parte dell'evento a causa dell'adesione delle gocce all'apparato fogliare, nell'intervallo di tempo che intercorre tra un evento pluviometrico ed il successivo agevola la riduzione del contenuto di acqua presente nel suolo portandolo ad un progressivo essiccamento a causa dei processi evapotraspirativi. Questa fase del ciclo idrologico di un tetto verde viene dunque fortemente influenzata dalla fisiologia della copertura vegetale ed in particolare dal volume di acqua evapotraspirante. [VanWoert et al. \(2005\)](#) dimostrano che i tetti verdi in cui si ha una predominanza di vegetazione appartenente alla famiglia delle crassulaceae (CAM) contribuisce solo marginalmente alla riduzione dei deflussi. Probabilmente perchè le piante succulente sono caratterizzate da una limitata evapotraspirazione e quindi non sono in grado di ridurre significativamente l'umidità del substrato. Con l'obiettivo di investigare quanto e come la vegetazione influenzi la risposta idrologica del tetto verde si sono confrontati gli eventi comuni misurati per il plot SR, in cui la vegetazione è costituita da un mix di piante di tipo succulento appartenente alla famiglia dei Sedum (CAM) e per il plot NR in cui copertura vegetale è costituita da un mix di graminacee e leguminose (C3). Dei 66 eventi comuni registrati durante i 15 mesi di osservazioni sono stati scartati tutti gli eventi (29) in cui la ritenzione è pari al 100% per entrambi i plots. Le seguenti considerazioni sui deflussi sono state effettuate normalizzando la portata defluita rispetto alla superficie complessiva dei plots per cercare di eliminare l'influenza dettata dalle diverse superfici complessive dei due plot. Lo spessore del substrato è costante (10 cm) per il plot SR mentre è pari rispettivamente a 8, 10, e 12 cm per le 3 parcelle costituenti il plot NR. Poichè lo spessore medio del substrato nei 3 plots coincide con lo spessore del substrato SR si è ritenuto che queste differenze potessero essere trascurate. I

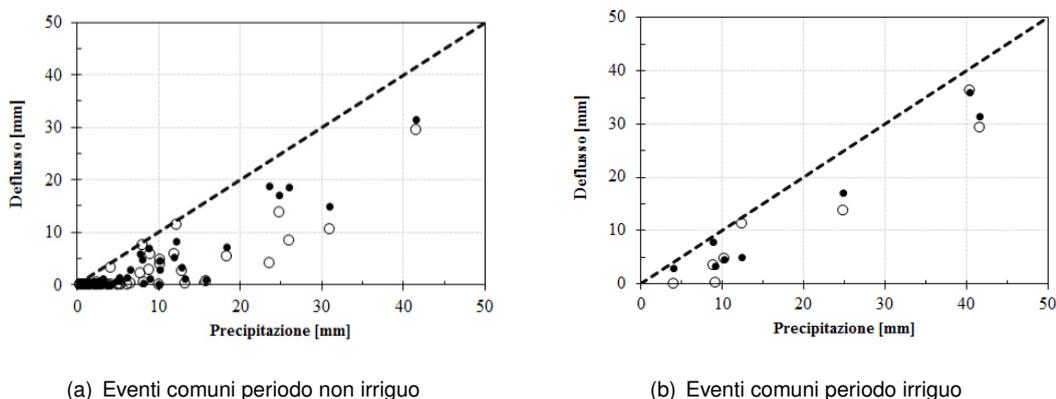


FIGURA 4.18: Regressione lineare tra precipitazione e ritenzione per gli eventi comuni al plot SR e al plot NR.

37 eventi comuni e con ritenzione non nulla per uno dei due tetti sono stati suddivisi

Eventi comuni	
Data inizio	Oct-13
Data fine	Dec-14
Eventi totali	66
Eventi ritenzione 100%	29
Eventi (0-10 mm)	19
Eventi (10-20 mm)	12
Eventi (20-30 mm)	3
Eventi (30+ mm)	3
Eventi invernali	6
Eventi primaverili	14
Eventi estivi	6
Eventi autunnali	11
Eventi periodo irriguo	8
Eventi periodo non irriguo	29

TABELLA 4.4: Caratteristiche riassuntive eventi comuni al SR e al NR

Periodo	Durata [min]	Volume irriguo [l * m ² /giorno]
22 Mag. - 07 Lug.	10	3.3
08 Lug. - 09 Ago.	5	1.6
09 Ago. - 25 Ago.	10	3.3

TABELLA 4.5: Gestione dell'impianto irriguo per il NR plot durante l'estate 2014

in funzione del regime irriguo. Le piante delle 3 sotto-parcelle del plot NR sono state irrigate dal 22 Maggio 2015 al 25 Agosto 2015 secondo lo schema indicato in tabella 4.5. I 29 eventi non inclusi nel periodo irriguo sono stati rappresentati in Fig. 4.18a. Questi eventi dunque rappresentano la ritenzione dei 2 plot a parità di condizioni al contorno. Il grafico mette in luce che generalmente il plot NR è in grado di ritenere una maggiore quantità di acqua. Questo fenomeno, che si accentua all'aumentare dell'altezza di precipitazione trova conferma anche in altri studi (Butler and Orians, 2011; Nagase and Dunnett, 2012; Schroll et al., 2011) effettuati in clima di tipo continentale. Il diverso comportamento è attribuibile principalmente al fatto che mentre le specie di tipo succulento tendono ad attivare il metabolismo di tipo CAM e quindi a chiudere gli stomi di giorno ed aprirli durante la notte per salvaguardarsi dai periodi di siccità o dalle elevate temperature e dunque a ridurre al minimo i volumi di acqua persa per evapotraspirazione, le altre piante effettuano una fotosintesi di tipo tradizionale con conseguente apertura diurna degli stomi e maggiori volumi evapotraspirati. La Fig. 4.18b mostra le relazioni afflussi/ deflussi del plot SR (in nero) e del plot NR (in grigio) durante il periodo irriguo. La necessità di inumidire giornalmente il suolo del plot NR per garantire la sopravvivenza delle piante pur determinando un incremento dell'umidità del suolo non

comporta un'elevata riduzione prestazionale del tetto. Questo fenomeno viene maggiormente evidenziato in Fig. 4.19 in cui in ordinata troviamo la data dei singoli eventi ed in ascissa la differenza tra la ritenzione misurata nel plot NR e quella misurata nel plot SR. La linea verde corrisponde ad una condizione di equità ovvero corrisponde alla condizione che si verificherebbe se il plot SR e il plot NR avessero la stessa ritenzione. Gli eventi in cui il plot NR ha mostrato prestazioni migliori (minore ritenzione) si trovano sopra la linea verde mentre i punti che si trovano al di sotto rappresentano eventi in cui il plot SR ha avuto prestazioni migliori rispetto al plot NR. I punti neri e quelli rossi rappresentano rispettivamente i dati registrati durante il periodo non irriguo ed irriguo. Durante il periodo irriguo (punti rossi) il plot NR continua a dimostrare una ritenzione superiore a quella del plot SR come dimostrato dall'abbondanza di punti sopra la linea di uguaglianza. Durante il periodo non irriguo si assiste generalmente allo stesso fenomeno ad eccezione del mese di Novembre in cui le migliori prestazioni del tetto a Sedum potrebbero essere principalmente imputabili alla copertura del NR plot con un telo per 2 settimane collocato sopra il GR per tutelare la crescita di nuove piante seminate i primi di Novembre. I risultati sperimentali ottenuti trovano conferma nello studio

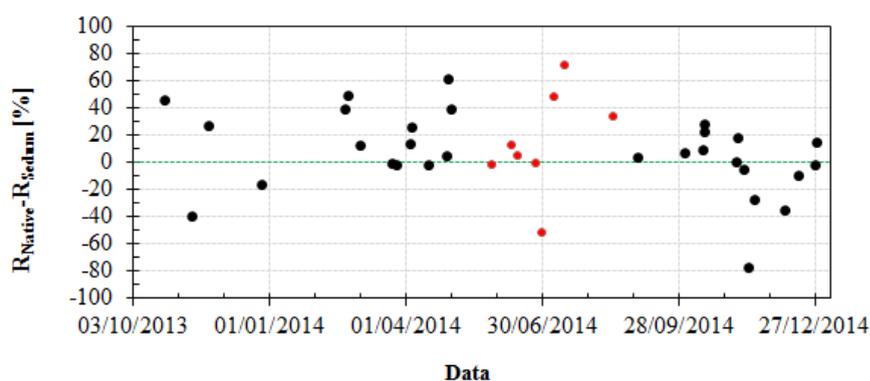


FIGURA 4.19: Confronto durante ogni evento considerato tra la ritenzione del NR e del SR. I punti neri corrispondono al periodo non irriguo mentre quelli rossi al periodo irriguo. La linea verde tratteggiata individua una condizione di ritenzione uguale.

effettuato la [Nagase and Dunnett \(2012\)](#), i quali analizzano la risposta idrologica di parcelle sperimentali (0.79 m^2) caratterizzate da diverse coperture vegetali in condizioni climatiche e pluviometriche controllate. La ricerca dimostra che le piante influenzano i deflussi ed in particolare che le specie di tipo erbaceo (assimilabili a quelle presenti nel plot NR), sono più efficienti nel ridurre i deflussi rispetto alle specie di tipo Sedum. I minori tassi di evapotraspirazione caratteristici delle specie di tipo Sedum non solo riducono l'abilità di un tetto verde di mitigare i deflussi ma spesso riducono i processi evaporativi del suolo ([Nagase and Dunnett, 2012](#)). Al contrario, le specie di tipo C3 e C4 generalmente traspirano utilizzando una quantità maggiore di acqua per molecola di CO_2 fissata; e quindi probabilmente è per questo motivo che dimostrano avere un più alto tasso di evapotraspirazione.

4.3.4 Conclusioni

In conclusione i risultati sperimentali ottenuti dimostrano che le specie contenute nel mix Native sono in grado di garantire delle migliori prestazioni in termini di ritenzione, rispetto alle specie di tipo Sedum, grazie alla loro capacità intrinseca di agevolare il processo di essiccamento del suolo. A questi benefici tuttavia si contrappone la necessità di un'irrigazione giornaliera durante il periodo estivo che, se da un lato viene scoraggiata da alcuni autori ([Butler and Orians, 2011](#)) perchè determina: l'allontanamento dall'obiettivo di creazione di un tetto verde capace di auto sostenersi, lo spreco di acqua potabile e richiede dei sistemi più complicati; dall'altro è sostenuta da altri che sottolineano invece come l'irrigazione agevoli l'evapotraspirazione e quindi migliori le prestazioni dei tetti verdi [Coutts et al. \(2013\)](#). Infine alcuni autori ([Lundholm, 2004](#)) incentivano l'introduzione di specie native (da contrapporre alla tendenza dominante negli ultimi anni di utilizzare nelle aree urbane specie non native) per aumentare il valore ecologico dell'intervento.

4.4 Osservazioni termiche

Partendo dallo stato dell'arte nel campo delle osservazioni termiche la presente sezione illustra: (1) i metodi con cui esse sono state effettuate presso il caso studio e (2) i risultati della campagna sperimentale.

4.4.1 Revisione della lettura Scientifica

La crescente sensibilità nei riguardi del dispendio di energia e le conseguenze economiche derivanti dal miglioramento delle prestazioni termiche degli edifici ha fatto sì che negli ultimi decenni la ricerca applicata e le aziende produttive si concentrasse sull'individuazione e sul perfezionamento di tecnologie che consentano la riduzione dei consumi. I tetti verdi sono considerati ormai da decenni delle valide alternative tecnologiche ai tetti tradizionali perchè garantiscono un impatto positivo sia al clima urbano (riduzione dei cambiamenti climatici su scala locale) e al microclima che alle condizioni termoigrometriche interne agli edifici ([Spala et al., 2008](#)). Le differenze tra un tetto tradizionale (membrana bituminosa nera) e un tetto vegetato sono sia qualitative che quantitative. Il processo di trasmissione del calore in un tetto verde sono completamente differenti. La radiazione solare, la temperatura esterna e l'umidità relativa vengono ridotte dalla presenza della superficie vegetata. Le piante, grazie alle loro funzioni biologiche quali l'attività fotosintetica e la traspirazione assorbono una significativa porzione della radiazione solare. I tetti verdi determinano principalmente due tipologie di benefici termici: il primo è il miglioramento del microclima interno all'edificio grazie all'aumento della massa inerziale all'interfaccia solaio-atmosfera; il secondo è la mitigazione dell'effetto isola di calore urbana.

Numerosi studi dimostrano che i tetti verdi riducono le variazioni di temperatura interna degli edifici riducendone i consumi energetici ([Berardi et al., 2014](#); [Castleton et al., 2010](#); [Jim, 2014b](#); [Wang et al., 2014](#)). Il flusso di calore attraverso il tetto verde è funzione di diversi fattori che interagiscono tra loro: (a) fattori estrinseci quali il clima e la stagione, (b) fattori intrinseci al pacchetto verde quali la massa della vegetazione, le caratteristiche del sistema di drenaggio, lo spessore, le proprietà fisiche ed il contenuto di umidità del substrato ed infine (c) fattori intrinseci all'edificio quali lo spessore del solaio, l'efficienza ed il tipo di isolamento termico e la presenza di impianti di riscaldamento/raffrescamento. Tuttavia le caratteristiche edilizie dell'edificio giocano un ruolo chiave. Infatti, l'effetto isolante dei tetti verdi, è tanto maggiore quanto peggiore è l'isolamento termico dell'edificio considerato ([Berardi et al., 2014](#); [Feng et al., 2010](#); [Hien et al., 2003](#); [Saadatian et al., 2013](#); [Spala et al., 2008](#); [Spolek, 2008](#); [Xiao et al., 2014](#)).

Indipendentemente dalle caratteristiche dell'edificio e quindi dai benefici ottenibili sulla scala locale i tetti verdi contribuiscono comunque alla riduzione delle temperature esterne e quindi alla mitigazione dell'effetto isola di calore (Urban Heat Island, UHI). Con questo termine si indica l'incremento della temperatura media delle aree urbane rispetto alle circostanti aree rurali a causa della presenza degli edifici. L'innalzarsi delle temperature urbane determina l'innalzamento dei consumi per aria condizionata e l'incremento dei picchi di domanda di energia elettrica (Hassid et al., 2000). Pantavou et al. (2011) dimostrano come, l'effetto isola di calore nella città di Atene, causi il raddoppiamento del carico di raffreddamento degli edifici e la triplicazione del picco di domanda elettrica. Santamouris (2014) recentemente, effettua la revisione di numerose tecnologie che puntano alla riduzione dell'effetto isola di calore evidenziando come, l'applicazione su larga scala dei tetti verdi, potrebbe ridurre la temperatura ambiente da 0.3 a 3 °C. Alcuni studi condotti nella città di Hong Kong nel dimostrare l'efficacia dei tetti verdi nel mitigare le temperature superficiali si soffermano sia sulla stima dell'influenza della biomassa (Jim, 2012) che sull'influenza di contrastanti meccanismi fotosintetici ed evapotraspirativi (Jim, 2014a,b). In particolare questi studi comparano l'effetto di raffreddamento derivante dall'applicazione di piante con metabolismo CAM (*Sedum mexicanum*) e piante con metabolismo tradizionale C3 (*Arachis pintoi*). Jim conclude lo studio affermando che entrambe le superfici vegetate sono caratterizzate da temperature inferiori rispetto a quelle registrate su un tetto nero di riferimento ma che a sua volta le differenze tra le temperature superficiali delle piante indicano che, in climi umidi subtropicali, le specie CAM sono caratterizzate da una limitata traspirazione diurna e quindi raggiungono temperature più elevate. La selezione nei mix commerciali di vegetazione appartenete alla specie CAM, alla quale appartiene il Sedum, deriva dal fatto che ci si è focalizzati sulla ricerca di piante capaci di sopravvivere in condizioni di forte stress idrico piuttosto che concentrarsi sull'abilità delle piante di garantire il raffreddamento (Blanusa et al., 2013). Come precedentemente illustrato le piante appartenenti alle specie Sedum rispondono agli stress idrici e alle elevate temperature attivando il metabolismo di tipo CAM attraverso il quale riescono a ridurre l'apertura stomatale diurna (Jones et al., 2002) e quindi la perdita di acqua per evapotraspirazione. Ciò però comporta sia la riduzione del fabbisogno idrico che l'incremento delle temperature superficiali. Emerge dunque come la selezione delle specie debba scaturire da un bilancio derivante dal risparmio derivante dall'utilizzo di specie capaci di auto sostenersi rispetto a quello derivante da un miglioramento delle prestazioni termiche. Il campo prove sperimentale della Scuola di Ingegneria consente la comparazione delle prestazioni termiche di piante caratterizzate da differenti vie metaboliche per cui, nella presente sezione, verrà illustrato (1) il risultato di una campagna sperimentale condotta a partire dal mese di settembre 2014 in cui si è effettuato il monitoraggio delle temperature superficiali di specie con metabolismo CAM e specie con metabolismo C3

attraverso l'utilizzo di sensori di temperatura (termocoppie) ed alcune immagini termografiche e (2) il monitoraggio in parallelo della temperatura dell'aria sopra i differenti strati vegetali per cercare di comprendere (a) a che distanza dalla superficie vegetata si perde l'influenza della vegetazione, (b) se e quanto la temperatura dell'aria venga influenzata dai processi evapotraspirativi e (c) le differenze tra temperatura dell'aria sopra le superficie vegetate e sopra un tetto tradizionale (membrana bituminosa nera). La presente ricerca, che basa i propri metodi sulle esperienze condotte in climi tropicali (Jim, 2014a,b) e nord europei (Blanusa et al., 2013), si pone dunque l'obiettivo di investigare se i loro risultati siano estendibili anche al clima italiano per i quali non esistono referenze relative al profilo verticale di temperatura esterno (vegetazione, aria sopra vegetazione, ambiente) ma solo a quelle relative al profilo verticale interno (vegetazione, substrato, solaio, aria interna all'edificio) (Fioretti et al., 2010).

4.4.2 Metodo

L'acquisizione delle temperature superficiali delle diverse temperature è avvenuta inizialmente mediante l'utilizzo di ispezioni termografiche e successivamente mediante l'installazione di termocoppie. Nonostante la prima metodologia consentisse di percepire con grande precisione le differenze di temperatura e consentisse di monitorare nello stesso momento diversi punti della superficie, l'utilizzo di questo tipo di tecnologia era limitata dall'impossibilità di disporre continuamente dello strumento e dall'impossibilità di effettuare riprese notturne. Tutto ciò ed il fatto che le termografie consentissero l'acquisizione di dati puntuali mentre si riteneva più interessante disporre di serie continue hanno determinato la scelta tecnica di proseguire il monitoraggio utilizzando le termocoppie. Quest'ultime se da un lato presentano lo svantaggio di acquisire la temperatura solamente in un punto definito della superficie, dall'altra presentano numerosi vantaggi quali (1) economicità, (2) semplicità di installazione e (3) possibilità di effettuare il monitoraggio in continuo. Nella presente sezione verranno descritti entrambi i metodi di acquisizione ed elaborazione dei dati ottenuti. I rilievi termografici utilizzati per ricavare le temperature delle differenti superfici (sedum, reference, native) sono stati effettuati avendo cura di inquadrare unicamente l'elemento desiderato e di posizionare lo strumento quanto più ortogonalmente possibile rispetto alla superficie. Le immagini così ottenute sono state rielaborate mediante il software Fluke SmartView 3.7 nei quali sono state impostate le condizioni al contorno corrispondenti alla temperatura ambiente e all'emissività della superficie considerata. L'emissività (ϵ) è il grado di efficienza nell'emissione della radiazione infrarossa da parte di un oggetto, dipende notevolmente dalle proprietà del materiale e varia tra 0 e 1 (corpo nero). È estremamente importante impostare la corretta emissività nella termocamera, per assicurare

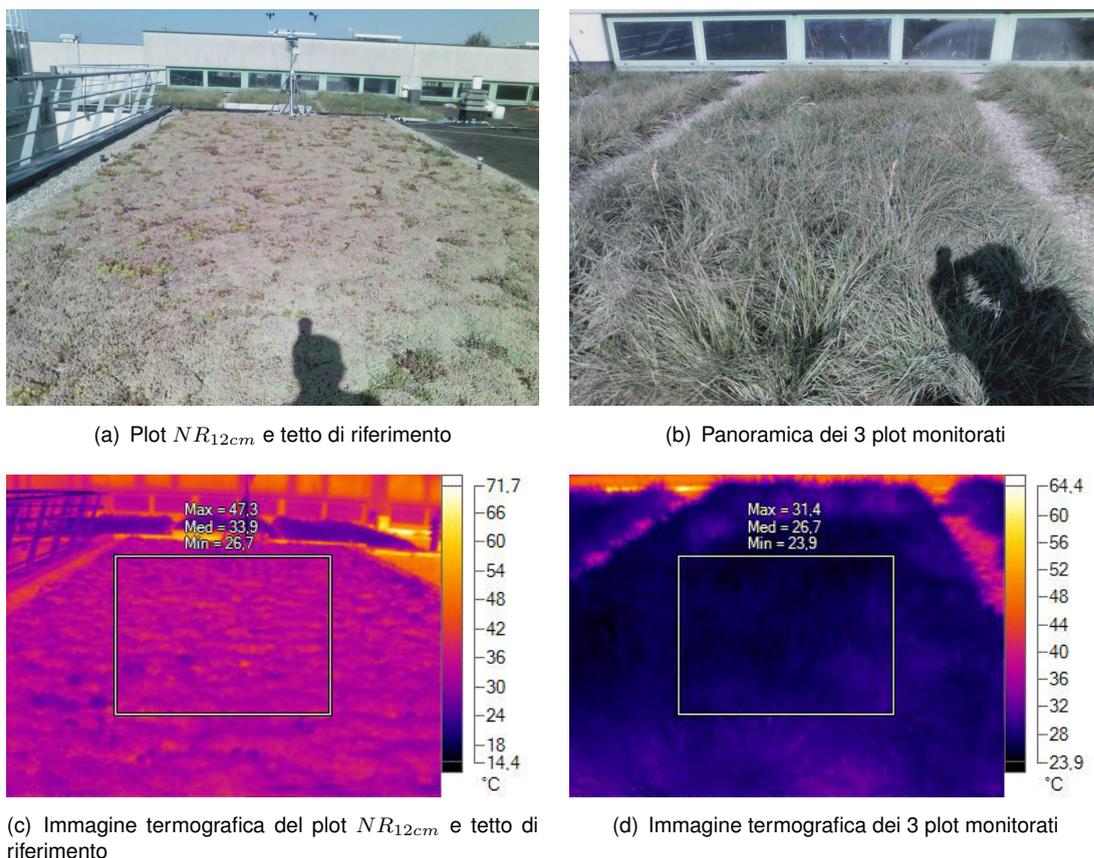


FIGURA 4.20: Fotografie e corrispondenti immagini termografiche del tetto verde sperimentale in data 27/09/2014

che le letture di temperatura siano corrette. La vegetazione usualmente è caratterizzata da valori di emissività prossimi all'unità (Oke, 1987); nel presente studio si è utilizzato un valore di emissività pari a 0.95 in analogia con quanto effettuato da Parizotto and Lamberts (2011). La temperatura ambiente è stata fatta coincidere con quella misurata dalla stazione meteo.

Le temperature finali (valori puntuali) per ogni termogramma si sono ottenute impostando una finestra grafica al centro del fotogramma e valutandone la temperatura media. Il lavoro è stato effettuato sia sui termogrammi che inquadrano le parcelle studiate nel loro complesso (vegetazione + substrato nudo, Fig. 4.20) che sui termogrammi in cui ci si è focalizzati unicamente sui particolari (Fig. 4.21). Il valore ultimo di temperatura per ciascun plot è stato ottenuto mediando i valori dei relativi termogrammi.

A partire dal 9 Ottobre 2014 i 3 plots sono stati ulteriormente equipaggiati con 8 termocoppie di tipo K. Le termocoppie sono state collegate a delle asticelle graduate e successivamente posizionate al centro dei 3 plot come illustrato in Fig. 4.22 ed in Fig. 4.23. L'acquisizione dei dati è stata effettuata ogni minuto e successivamente mediata sull'ora. La posizione delle termocoppie e delle sonde di temperatura ha seguito lo schema riportato in tabella 4.6. Le termocoppie sono state disposte a diverse quote

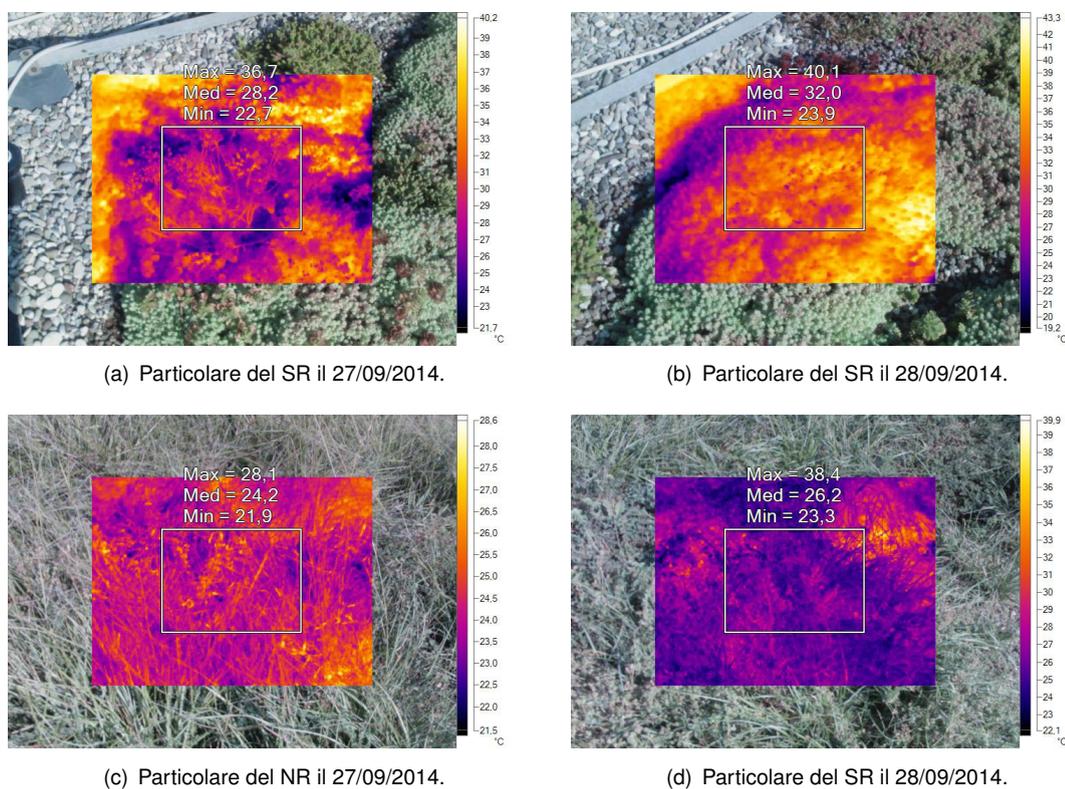


FIGURA 4.21: Particolari del Sedum e del Bromus durante le acquisizioni termografiche.

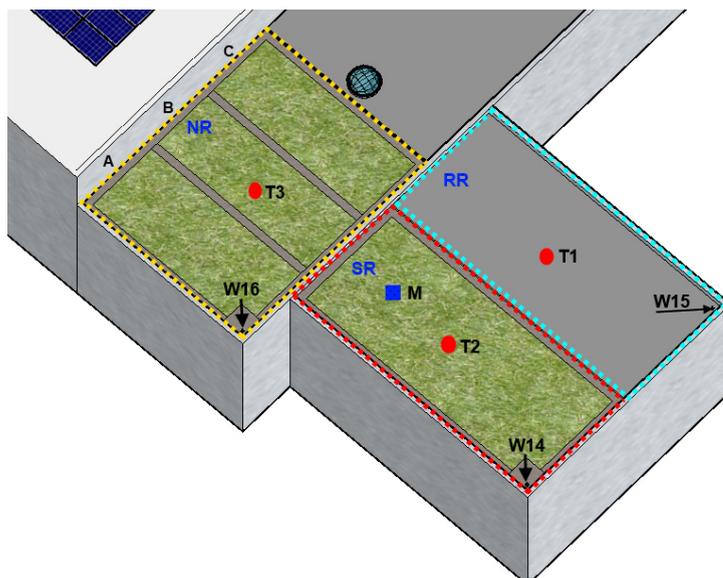


FIGURA 4.22: Posizionamento planimetrico dei diversi sensori: i sensori T1, T2 e T3 (cerchi rossi) rappresentano le aste graduate su cui sono alloggiate le termocoppie, il sensore M (rettangolo blu) individua la stazione meteo mentre le frecce segnalano i misuratori di portata



(a) Termocoppie posizionate sul Reference Roof. (b) Termocoppie posizionate sul Sedum Roof. (c) Termocoppie posizionate sul Native Roof.

FIGURA 4.23: Posizionamento termocoppie sui plot monitorati

Posizine	Quota [cm]	Periodo 1 [10-16 ott.]	Periodo 2 [16-29 ott.]	Periodo 3 [12-30 nov.]	Periodo4 [28 gen.-2 feb.]
SR	-10	#	#	#	#
	0	x	x	x	x
	10	x	x	x	
	20	x	x	x	x
	30	x	x	x	
NR	0		x		x
	10		x		
	20		x		x
	30		x		
RR	0	x #	#	x#	x #
	10	x		x	
	20	x		x	x
	30	x		x	

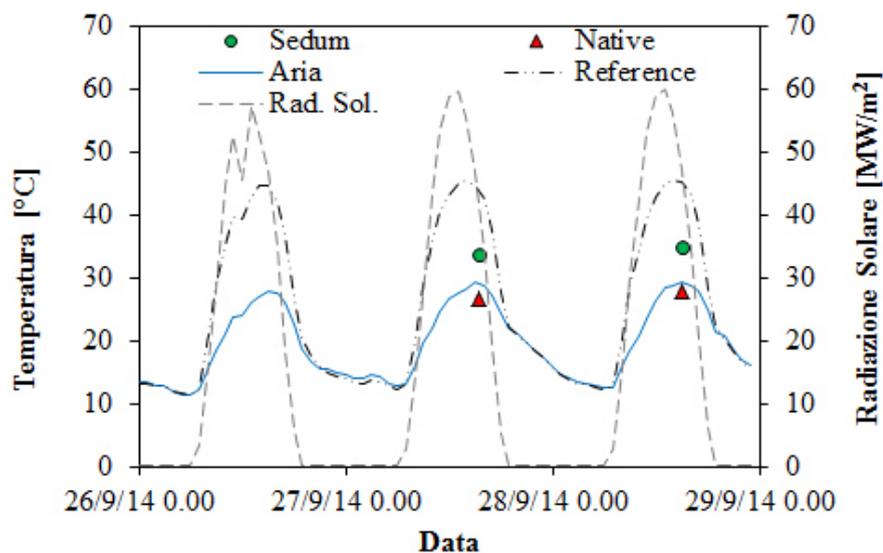
TABELLA 4.6: Posizione delle termocoppie (x) e delle sonde di temperatura (#) durante il monitoraggio 2014-2015. La quota 0 corrisponde alla quota della superficie esterna.

con l'obiettivo di ricostruire il profilo verticale di temperatura e comprendere sino a quale quota la temperatura dell'aria risentisse della presenza del tetto verde. La quota zero per i due tetti verdi corrisponde alla temperatura della vegetazione mentre per il plot RR corrisponde alla temperatura della membrana bituminosa nera. La quota -10 *cm* presente nel plot SR coincide con l'interfaccia substrato (spessore 10 *cm*) e l'elemento di drenaggio. I dati sia delle termocoppie che delle sonde, acquisiti ogni 5 minuti, sono stati mediati sull'ora e confrontati con le variabili metoclimatiche registrati dalla stazione meteo.

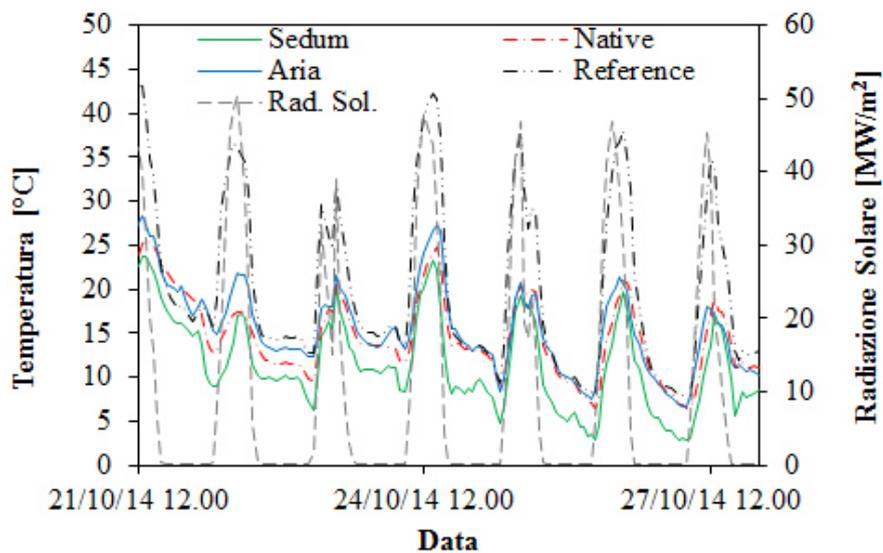
4.4.3 Risultati

La presente sezione si pone l'obiettivo di analizzare i risultati delle elaborazioni dei dati raccolti durante la campagna di monitoraggio. In particolare i dati sono stati suddivisi in due gruppi caratterizzati da differenti condizioni climatiche. Il primo gruppo include le analisi termografiche condotte a fine settembre (27-28 Settembre 2014) e i dati acquisiti per mezzo delle termocoppie nel periodo 21-27 Ottobre 2014. Il secondo gruppo include le acquisizioni di temperatura effettuate durante il mese di novembre e tra gennaio e febbraio 2015. Le temperature registrate sul RR fungono da riferimento; dal confronto tra quest'ultime e quelle registrate sui plot SR e NR verranno desunti i benefici/svantaggi derivanti dall'applicazione di una superficie vegetata sopra un tetto tradizionale.

La Fig. 4.24 mostra l'andamento delle temperature: dell'aria, della membrana bituminosa nera (RR) e delle radiazione solare dal 26 al 29 settembre. I punti indicano le temperature del SR e del NR ricavati attraverso l'analisi dei dati termografici. Le fluttuazioni giornaliere di temperatura dell'aria seguono fedelmente l'andamento della radiazione solare. La temperatura massima giornaliera dell'aria si registra sempre tra le 15:00 e le 16:00 ed è mediamente pari a 28,5 °C mentre la minima si registra qualche ora prima dell'alba e raggiunge il valore minimo di 11.33 °C il 26/09/2014. La temperatura massima nella guaina bituminosa, che raggiunge i 47 °C il 29/09/2014 precede sempre il picco di temperatura dell'aria. Durante la notte, a causa dell'assenza di radiazione solare, la temperatura decresce sino a coincidere con quella dell'aria. Risulta pertanto evidente come, nell'arco della giornata, la guaina sia soggetta ad uno sbalzo termico di circa 40 °C. Le temperature del sedum e del reference in entrambi i giorni di monitoraggio si attestano rispettivamente intorno ai 32-34 °C e ai 26-28 °C. Se da un lato quindi è evidente che i tetti verdi sono in grado di garantire una riduzione del picco di temperatura di circa 10-15 °C dall'altro risulta interessante evidenziare come a parità di pacchetto verde la vegetazione presente nel NR sia mediamente più fresca di circa 7 °C rispetto al Sedum, ma che sia anche più fresca della temperatura dell'aria. Questo fenomeno, che trova riscontro in letteratura negli studi effettuati da (Blanusa et al., 2013; Jim, 2014b), è attribuibile all'utilizzo del metabolismo di tipo CAM delle specie di tipo Sedum (Sayed, 2001). In presenza di temperature elevate, il sedum tende a chiudere gli stomi durante il giorno, per salvaguardare l'acqua al suo interno. Durante le ore notturne, più fresche, il sedum apre gli stomi e cattura la CO₂, trasformandola successivamente in acidi organici per poi utilizzarli durante il giorno durante la fotosintesi nonostante la chiusura degli stomi. Voyde et al. (2010a) riscontrarono invece che, se la temperatura dell'aria si aggira intorno ai 22 °C, il sedum (se non soggetto a stress idrici) tende ad aprire gli stomi durante il giorno. Questo tipo di metabolismo ausiliario del sedum fa sì che il suo comportamento durante le ore più calde della giornata sia assimilabile a quello di un corpo solido irraggiato piuttosto che quello di una specie vegetale.



(a) Settembre 2014



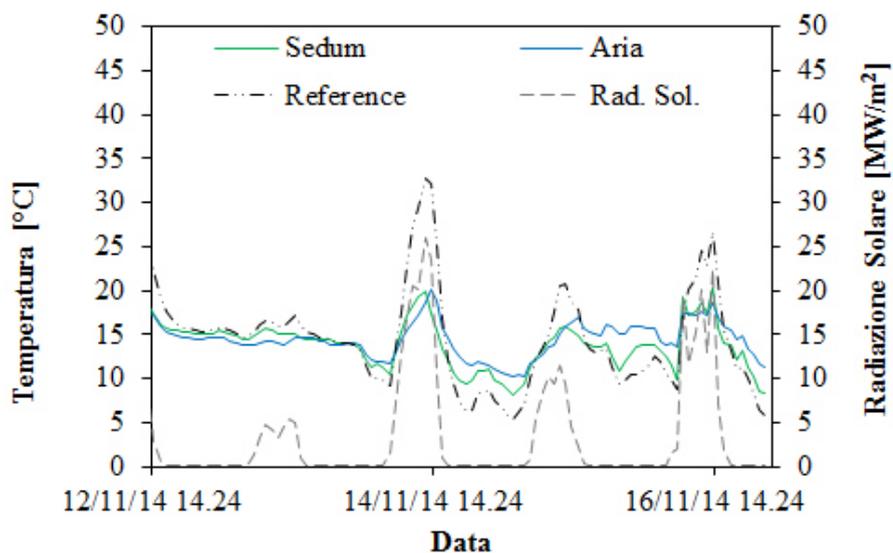
(b) Ottobre 2014.

FIGURA 4.24: Variazione media oraria durante i medi di settembre e ottobre della temperatura della superficie a sedum (verde), a bromus e leguminose (Rosso), dell'aria (blue) e del tetto nero di rigerimento (nero). La linea tratteggiata grigia rappresenta la radiazione solare.

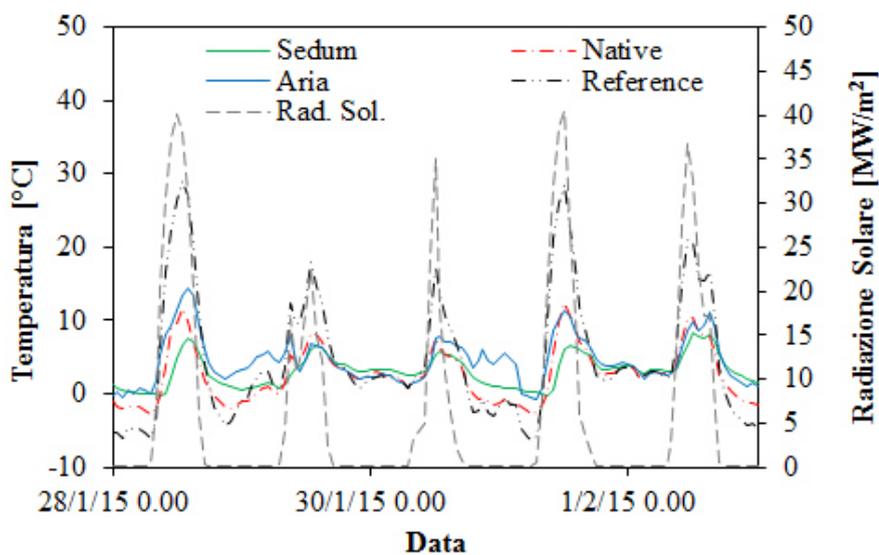
Il sedum raggiunge temperature tanto più elevate quanto maggiore è la radiazione solare. Le temperature raggiunte dal sedum in queste giornate sono comparabili a quelle misurate da [Jim \(2014b\)](#) in giornate estive soleggiate ad Hong Kong. Le graminacee e le leguminosae presenti nel plot NR sono invece caratterizzate da un metabolismo di tipo C3 per cui, nonostante si siano adattate a vivere in ambienti aridi, effettuano una fotosintesi di tipo tradizionale con apertura diurna degli stomi. La traspirazione diurna delle piante del plot NR ha un ruolo fondamentale per la termoregolazione dell'ambiente in quanto comporta un assorbimento di energia termica (radiazione solare) e la dissipazione di un'elevata quantità di calore latente cui consegue una riduzione del calore immagazzinato nei restanti strati del tetto verde. Il plot NR dimostra dunque di essere in grado di garantire un miglior effetto raffrescante.

La Fig. 4.24b mostra sia l'andamento delle temperature di sedum, reference e native in continuo (acquisizione da termocoppie) che quello dei parametri climatici. La figura evidenzia come ad una riduzione del valore massimo di radiazione solare corrisponda una riduzione di temperatura che si attesta attorno al valore medio di 14.68 °C con un picco massimo di 28.26 °C il 21/10/2014 alle 13:00 ed un valore minimo di 7.87 °C il 29/10/2014 alle 06:00. La temperatura dell'aria mostra un trend calante nel passare dal 21 al 27 ottobre. L'umidità dell'aria raggiunge valori attorno il 90% durante la notte e pari al 40% durante il giorno. Le temperature del tetto nero di riferimento mostrano un andamento simile a quello riscontrato nel mese di settembre con picchi diurni che lambiscono i 40 °C ogni giorno. Al calar del sole il tetto tende a raffreddarsi rapidamente e a raggiungere le temperature dell'aria. Anche in questa circostanza il Sedum ed il Native mostrano temperature diurne notevolmente inferiori a quelle del RR e spesso coincidenti con quelle dell'aria. È interessante notare come durante questi giorni di monitoraggio, il sedum ed il native dimostrano avere picchi diurni di temperatura spesso coincidenti ma temperature notturne differenti. Il sedum si raffredda molto più rapidamente e raggiunge temperature 3-4 °C inferiori sia a quelle del Native che a quelle dell'aria. Il comportamento del sedum durante questo periodo è analogo a quello riscontrato da [Jim \(2014a\)](#) nella città di Hong Kong. In entrambi i campi prova sperimentali il sedum tende a scaldarsi più lentamente del RR e del NR durante le prime ore della giornata e a freddarsi più rapidamente al calar del sole. Ciò significa che il Sedum necessita di una maggiore quantità di energia solare per scaldarsi ma che questa viene immediatamente persa appena si riduce l'input rappresentato dalla radiazione solare.

La Fig. 4.25a illustra le variazioni diurne di temperatura durante il mese di novembre. Durante i 4 giorni (12-16 novembre) la temperatura media è pari a 14.5 °C e l'umidità dell'aria raggiunge il valore medio dell'85% con picchi del 100% durante la notte. I bassi valori di radiazione solare evidenziano l'elevato grado di copertura nuvolosa. Durante questi 4 giorni si registra inoltre una precipitazione complessiva di 4.8 *mm* con intensità



(a) Novembre 2014



(b) Gennaio 2014

FIGURA 4.25: Variazione media oraria durante i mesi di novembre e gennaio della temperatura della superficie a sedum (verde), a bromus e luguminose (Rosso), dell'aria (blue) e del tetto nero di rigerimento (nero). La linea tratteggiata grigia rappresenta la radiazione solare.

che non superano i 2.4 mm/h . Sfortunatamente in questo periodo non è stato possibile registrare le temperature superficiali del plot NR a causa della sua completa copertura con un geo-sintetico per favorire l'acrescimento dei nuovi semi appena impiantati.

Le temperature del Sedum e del tetto di riferimento tendono ad avere un andamento simile in quanto la riduzione della radiazione solare comporta una drastica riduzione delle temperature superficiali. Tuttavia è evidente come il 14 novembre all'aumentare della radiazione solare il RR superi immediatamente i $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Durante la notte il RR raggiunge le temperature superficiali minime, confermando l'elevata escursione termica a cui è soggetta la membrana ogni giorno.

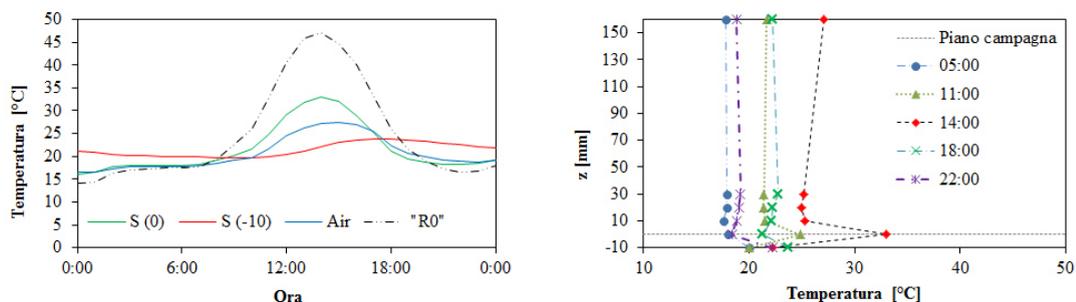
Il sedum anche in questo caso, in presenza di cielo sereno (14/11/2014) dimostra lo stesso comportamento già riscontrato nel mese precedente, ovvero, alla necessità di un maggior tempo per scaldarsi contrappone un raffreddamento molto veloce. La temperatura minima notturna del sedum si attesta qualche grado in meno rispetto a quella dell'aria ma risulta comunque superiore a quella del RR.

In Fig. 4.25b vengono mostrate le variazioni diurne di temperatura durante i mesi invernali (gennaio-febbraio) delle temperature nelle tre superfici studiate. La temperatura dell'aria varia da valori minimi prossimi allo zero (temperatura minima $-0.98 \text{ }^\circ\text{C}$) durante la notte a temperature massime diurne che, ad eccezione del 28 gennaio ($14.48 \text{ }^\circ\text{C}$) non superano i $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Nelle giornate soleggiate (28, 31, 1) l'irraggiamento solare massimo si registra alle ore 12:00 mentre il picco di temperatura nella guaina, che si attesta intorno ai $25 \text{ }^\circ\text{C}$, si registra alle ore 13:00. Durante la sera le temperature del RR decrescono rapidamente. La temperatura minima, pari a $-6.31 \text{ }^\circ\text{C}$ viene registrata il 31 gennaio alle 06:00 ed è $5 \text{ }^\circ\text{C}$ inferiore alla temperatura ambiente. Entrambi i tetti verdi dimostrano, anche in periodo invernale, di ridurre le escursioni termiche giornaliere ed in particolare riescono a garantire temperature minime notturne $4/5 \text{ }^\circ\text{C}$ superiori a quelle della superficie di riferimento. Durante questo periodo il sedum è in grado di garantire temperature minime notturne superiori a quelle misurate nel Native. I tetti verdi dimostrano quindi generalmente di essere in grado di ridurre le temperature massime giornaliere. Questa capacità comporta sia dei benefici al microclima esterno all'edificio che una riduzione dei carichi di raffreddamento necessari per mantenere le temperature interne agli edifici confortevoli. Con l'obiettivo di investigare entro quale quota si perdesse l'influenza del tetto verde sono stati analizzati i profili verticali di temperatura durante le varie ore del giorno. Sfortunatamente non si è potuto effettuare questo tipo di analisi durante il mese di settembre a causa del sistema di acquisizione dei dati di temperatura (termografie). A titolo esemplificativo mostriamo dunque i risultati della giornata più calda presente nell'intero dataset (10/10/2015). La Fig. 4.26 mostra: (a) le variazioni diurne della temperatura dell'aria, della superficie di riferimento (R0), della superficie vegetata e dell'interfaccia substrato/drenaggio nel plot SR; (b) il profilo verticale di temperatura nelle ore più rappresentative della giornata nel plot SR; (c) il profilo

verticale di temperatura nelle ore più rappresentative della giornata nel plot RR; (d) la comparazione tra il profilo verticale del plot SR e RR durante l'ora più calda della giornata. I sensori di temperatura sono stati posizionati ogni 10 cm. La quota 0 coincide per entrambi i plot alla superficie esterna. La quota -10 nel plot SR mostra l'andamento della temperatura al di sotto del substrato. La Fig. 4.26a evidenzia come il substrato, presente al di sotto della superficie a sedum, si comporti come una massa inerziale caratterizzata da una alta capacità termica in grado di garantire 5 ore di sfasamento tra i picchi di temperatura. La temperatura del substrato oscilla tra il valore minimo di 19.96 °C alle 11:00 ed il valore massimo di 23.57 °C alle 19:00 ciò garantisce una riduzione delle escursioni termiche della membrana impermeabilizzante posta sotto il plot SR e quindi un allungamento della vita utile della stessa. La conoscenza dei profili verticali di temperatura sopra la superficie vegetata, in comparazione con quella di riferimento, è stata studiata con l'ottica di individuare entro quale quota si continua a godere dei benefici derivanti dall'applicazione di superfici vegetate. Le Fig. 4.26b e c mostrano rispettivamente la colonna verticale di temperatura nelle ore più significative per il plot SR e per il plot RR. Risulta evidente la tendenza del sedum a scaldarsi velocemente durante la mattina e a raffreddarsi altrettanto velocemente al calar del sole. Le differenze di temperature, significative sulle superfici, tendono a ridursi all'aumentare della quota; già a 10 cm le differenze di temperatura passano (ore 15:00) dai 14.9 °C ai 1.6 °C (Fig. 4.26 d) e decrescono linearmente sino al raggiungimento della temperatura dell'aria sopra entrambe le superfici. Queste differenze riscontrate tra il sedum e il RR sono ancora più evidenti sulle superfici dei green roof ricoperte da specie vegetali C3 grazie alle inferiori temperature superficiali. Sfortunatamente non è stato possibile dimostrare queste differenze attraverso la comparazione diretta dei dati di monitoraggio, a causa delle lacune del dataset.

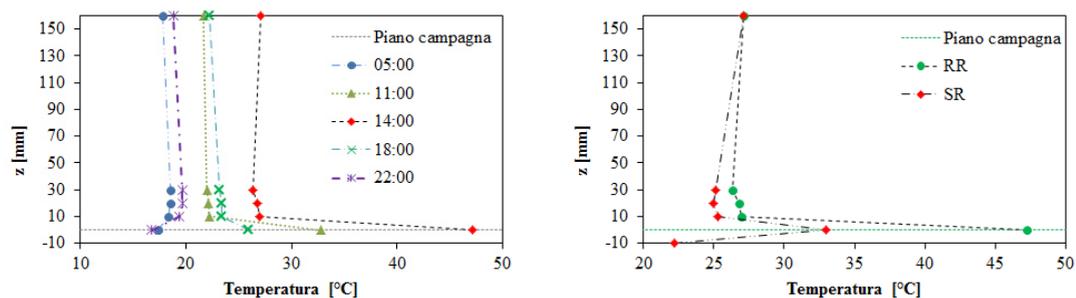
4.4.4 Conclusioni

Grazie al supporto fornito dal campo prove, questa sezione dello studio ha consentito la comparazione delle prestazioni termiche di due differenti specie vegetali caratterizzate da un meccanismo di evapotraspirazione comune C3 e non comune CAM, rispetto ad una superficie di riferimento (RR) sia in condizioni quasi-estive (settembre) che in condizioni invernali (gen-feb). Durante i giorni soleggiati e più caldi (settembre 2014), in un edificio ricoperto da membrana bituminosa, una grande quantità di calore attraversa il solaio e giunge all'interno dell'edificio riscaldando la temperatura dell'aria. Ciò comporta un incremento del carico elettrico di raffreddamento necessario per riportare la temperatura a valori confortevoli. Questo fenomeno è tanto più intenso quanto maggiore è la radiazione solare. Durante il periodo estivo il sedum ed il native dimostrano di



(a) Temperature superficiali diurne dell'aria (Air), sulla superficie di riferimento (R0), sulla superficie vegetata a sedum (S0) e all'interfaccia substrato/drenaggio nel plot SR.

(b) Profilo verticale di temperatura sul plot SR durante le ore più significative della giornata.



(c) Profilo verticale di temperatura sul plot RR durante le ore più significative della giornata.

(d) Comparazione dei profili verticali di temperatura durante l'ora più calda della giornata.

FIGURA 4.26: Profili verticali diurni di temperatura nel tetto di riferimento e nel tetto vegetato a sedum (10/10/2014)

essere in grado di ridurre le escursioni termiche giornaliere a cui è sottoposto il solaio su cui si trovano. Tuttavia, le temperature elevate raggiunte dal sedum, suggeriscono che anche nel nostro clima, come già riscontrato in clima sub-tropicale (Jim, 2014b), la vegetazione con metabolismo CAM non è in grado di effettuare l'evapotraspirazione diurna (apertura stomi) e quindi si dimostra meno efficiente. Il tetto ricoperto da vegetazione di tipo C3 (NR) si dimostra in grado di raggiungere temperature inferiori a causa dell'apertura diurna degli stomi conseguente alla necessità di effettuare contemporaneamente traspirazione e fotosintesi.

Durante il periodo autunnale e invernale i tetti verdi continuano a ridurre gli sbalzi termici giornalieri a cui è soggetta la membrana. Inoltre l'abbassamento notturno della temperatura del tetto di riferimento determina una dissipazione del calore interno all'edificio in misura tanto maggiore quanto minore è l'isolamento dell'edificio stesso; questo flusso di calore causa un raffreddamento della temperature interne e quindi una riduzione del comfort. Sebbene i tetti verdi dimostrino di raggiungere temperature superficiali diurne inferiori a quelle del reference durante la notte sono in grado di cedere gradualmente il calore immagazzinato nel substrato. Il substrato e il drenaggio inoltre, essendo in grado di immagazzinare acqua si dimostrano essere in grado di intercettare e stoccare

calore sensibile. I tetti verdi sono dunque in grado di garantire un effetto di riscaldamento passivo che potrebbe avere interessanti implicazioni con il bilancio energetico dell'edificio.

I profili verticali di temperatura sopra le superfici a sedum e sopra il tetto di riferimento durante una calda e soleggiata giornata autunnale hanno evidenziato come il tetto verde sia in grado di ridurre le temperature lungo la colonna di aria. Questo tipo di informazione è da considerarsi utile in particolare qualora si pensasse di migliorare il rendimento di pannelli solari ([Chemisana and Lamnatou, 2014](#); [Nagengast et al., 2013](#); [Scherba et al., 2011](#)) o di eventuali torri evaporative ponendoli al di sopra dei tetti verdi. Le torri di raffreddamento sono delle macchine che vengono utilizzate nell'ambito del "riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria". Esse sono destinate a dissipare il calore accumulato dall'acqua del circuito di raffreddamento dell'impianto; tale dissipazione avviene principalmente per effetto dell'evaporazione dell'acqua stessa nell'aria con la quale viene in contatto (da qui la definizione di "evaporative"): l'acqua viene immessa dall'alto e per caduta viene portata a contatto con l'aria ambiente. Una riduzione della temperatura dell'aria ambiente anche di soli pochi gradi comporterebbe dunque un miglioramento del rendimento di queste macchine e quindi una riduzione delle spese energetiche.

Capitolo 5

Modellazione numerica dei processi idrologici

Il presente capitolo inizialmente descrive lo stato dell'arte nel campo della modellazione numerica dei processi idrologici nei tetti verdi. Successivamente descrive i dati sperimentali relativi alle variazioni di umidità del suolo in tempo secco e propone e valuta l'efficienza di alcuni modelli per la stima dell'evapotraspirazione reale. Infine, nell'ultima parte, descrive l'implementazione mediante il codice di calcolo SWMM del modello numerico del tetto di riferimento e del tetto verde a sedum, ne illustra le fasi di calibrazione/validazione e mostra i risultati della simulazione in continuo (12 mesi).

5.1 Revisione della letteratura scientifica

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente interesse nei confronti di tutte quelle tecnologie atte alla riduzione ed al rallentamento dei volumi defluiti nel sistema fognario. Tale interesse è spesso stato positivamente tradotto dalle Amministrazioni Pubbliche di diversi paesi (in particolare in Europa e Nord America) in sgravi fiscali o incentivi economici (She and Pang, 2010; Zhang and Guo, 2013) finalizzati all'indirizzamento dei proprietari di immobili verso l'installazione di tecnologie quali i tetti verdi o altre SUDS (Sustainable urban drainage systems). È pertanto diventato indispensabile individuare dei metodi che consentano la valutazione delle prestazioni dei tetti verdi soprattutto nell'ottica di distribuire equamente tali incentivi. Se da un lato nel corso degli anni sono state proposte numerose relazioni empiriche che correlano la precipitazione ed i deflussi, come illustrato nel capitolo 4, dall'altro in particolare dal 2010 ad oggi sono un numero crescente gli autori che propongono dei modelli che consentono la previsione

dei deflussi in funzione della precipitazione e di un numero variabile di parametri. Alcuni di essi si propongono di descrivere nel dettaglio la dinamica di un singolo processo idrologico; altri invece, si propongono di descrivere porzioni maggiormente estese del ciclo idrologico, rappresentando variabili che discendono dall'integrazione di più processi. I modelli sino ad ora proposti per la modellazione dei processi idrologici, escludendo quelli empirici di cui si è ampiamente parlato nel capitolo precedente, possono essere classificati come: (1) modelli fisicamente basati, ovvero modelli originariamente nati per la modellazione degli acquiferi in mezzi porosi parzialmente saturi; (2) modelli concettuali in cui i tetti verdi vengono schematizzati mediante combinazione di serbatoi lineari e non lineari; (3) modelli basati sul bilancio idrico in cui i tetti verdi vengono pensati come semplici serbatoi con restrizioni sui deflussi (She and Pang, 2010). I modelli idrologici sviluppati dalla fine del XXI secolo a oggi sono molteplici. Zimmer and Geige (1997) svilupparono un modello a serbatoio lineare/non-lineare per la modellazione di tetti verdi e pavimentazioni permeabili soggetti a ietogrammi sintetici di precipitazione di tipo rettangolare. Bengtsson et al. (2005) analizzano i dati di run-off derivanti da un modello fisico in scala ridotta (1.54 m^2) ne derivarono un idrogramma unitario che una volta convertito in piogge reali consente la stima dei deflussi. Il principale limite del modello di Bengtsson et al. (2005) consiste nel fatto che sia applicabile solo a tetti verdi identici a quello utilizzato per lo studio. Hilten et al. (2008) utilizzano il software Hydrus-1D, che risolve numericamente le equazioni di Richardò per mezzi parzialmente saturi per la predizione del deflusso in un tetto verde costituito da 100 mm di substrato e assenza di drenaggio, sulla base dei singoli eventi. Dallo studio emerge la necessità di caratterizzare al meglio le proprietà fisiche del suolo che non vengono direttamente misurate ma desunte per calibrazione. L'uso di Hydrus-1D viene esteso da Palla et al. (2012) che lo combinano con un modello a serbatoio lineare ottenendo in questo modo un modello meccanicistico per la simulazione di un tetto verde costituito da due strati di materiale (substrato e drenaggio). Nel modello meccanicistico Hydrus-1D viene utilizzato per modellare il processo di infiltrazione monodimensionale (flusso verticale) mentre il modello a serbatoio lineare viene utilizzato per la modellazione dell'infiltrazione laterale e dei processi di convoluzione. I parametri fisici dei mezzi porosi modellati vengono, in contrapposizione di quanto effettuato da Hilten et al. (2008), misurati o referenziati con la letteratura esistente. Nello stesso studio Palla et al. (2012) propongono un secondo modello di tipo concettuale costituito da 3 serbatoi lineari in cascata. Entrambi i modelli vengono calibrati sulla base di eventi registrati durante la fase di monitoraggio di un tetto verde in scala reale situato a Genova. Dalla comparazione dei due modelli emerge che il modello meccanicistico-Hydrus 1D consente una previsione più accurata dei deflussi rispetto al modello concettuale che tuttavia dimostra di raggiungere prestazioni accettabili. Gli autori raccomandano l'utilizzo del modello concettuale, quando si è interessati alla stima dei deflussi e non alla variazione di umidità nel suolo.

L'utilizzo di Hydrus-1D viene riproposto da [Hakimdavar et al. \(2014\)](#) per modellare il comportamento di 3 tetti verdi caratterizzati da identica stratigrafia ma da superfici che variano dai 0.09 ai 310 m^2 . Gli autori concludono che il modello é in grado di simulare solo parzialmente il comportamento di tetti verdi caratterizzati da diversa scala e che le prestazioni del modello in fase previsionale, generalmente non ottimali, crescono con l'aumentare dell'area drenata e del volume di ritenzione.

La modellazione dettagliata delle variazioni di umidità nel substrato durante i singoli eventi vengono modellate da [Palla et al. \(2009\)](#) utilizzando il modello SWMM-2D, basato sulle equazioni di Richardò. Anche in questo caso il modello viene calibrato e validato con i dati sperimentali di un tetto verde in scala reale situato a Genova. [Kasmin et al. \(2010\)](#) utilizzano un semplice modello concettuale a due parametri in cui il deflusso viene descritto mediante un serbatoio non lineare. Nonostante il modello sia in grado di predire con grande precisione il deflusso, é di scarso interesse perché i differenti processi vengono combinati in un unico processo equivalente. [Sherrard and Jacobs \(2012\)](#) propongono un modello a cinque parametri in cui, con un bilancio di massa con time-step diurno riproducono il volume defluito su base giornaliera e annuale. [Jarrett et al. \(2006\)](#) propongono un modello per la determinazione del bilancio annuale ed un altro per la modellazione dei singoli eventi. [Stovin et al. \(2013\)](#) propongono un modello per quantificare il deflusso sulla base di simulazioni in continuo. I risultati del modello mostrano una riduzione volumetrica che vari da 0.19 (freddo, clima umido) a 0.59 (caldo, clima secco) in funzione delle condizioni climatiche registrate in Gran Bretagna. [She and Pang \(2010\)](#) sviluppano un modello fisicamente basato organizzato in 3 sottomodelli: (1) modello evapotraspirativo, (2) modello di infiltrazione (3) modello di propagazione del deflusso (flow routing). I primi due sottomodelli scitti in fortran vengono importanti nel software US EPA SWMM5 nel quale é implementato il modello 3. Il modello utilizza le equazioni di Green Ampt e la legge di Darcy per modellare i processi nel substrato. Il drenaggio viene invece modellato mediante l'equazione di Manning. L'ET viene posta pari a zero durante la precipitazione e considerano un decadimento esponenziale dell'umidità del suolo per simularne l'effetto in tempo secco. Il modello viene calibrando utilizzando due eventi, il primo caratterizzato da una lunga durata ed il secondo caratterizzato da un tempo di ritorno superiore ai due anni. Le prestazioni del modello risultano accettabili tuttavia sembra sovrastimare significativamente i picchi di deflusso. Nel manoscritto vengono inclusi diversi parametri di calibrazione senza tuttavia suggerirne il range di variazione ai lettori. Infine, con lo scopo di ottenere i risultati che desideravano, il drenaggio viene modellato utilizzando una scabrezza fittizia non compatibile con quella della plastica. [Carbone et al. \(2014\)](#) propongono un modello concettuale per la predizione del deflusso dei tetti verdi che viene calibrato e validato mediante delle prove sperimentali effettuate su un tetto verde in scala ridotta (0.15 m^2) soggetto a precipitazioni sintetiche (intensità costante). Il modello viene suddiviso in

3 blocchi ciascuno dei quali rappresentano gli strati principali del tetto verde (vegetazione, substrato, drenaggio) e nei quali vengono risolti i bilanci di massa caratteristici. [Lamera et al. \(2014\)](#) sviluppano in Matlab un modello in cui, in controtendenza rispetto ai precedenti studi, il processo di infiltrazione non viene espresso mediante l'approccio di Darcy-Richards ma attraverso l'utilizzo del modello semplificato, tipo "bucket", che si basa essenzialmente sul concetto di immagazzinamento di acqua nel suolo fra i limiti di capacità di campo e di punto di appassimento. Il modello, calibrato e validato sulla base dei singoli eventi derivanti dalle esperienze condotte da [Stovin et al. \(2012\)](#) in tetti verdi in scala ridotta (3 m^2) e da [Palla et al. \(2012\)](#) in tetti verdi in scala reale, dimostra una buona capacità di previsione dei deflussi. Il principale limite del modello è l'assenza di un modulo per la modellazione dell'evapotraspirazione e quindi l'impossibilità di effettuare simulazioni in continuo. [Burszta-Adamiak and Mrowiec \(2013\)](#) utilizzano il modulo LID (Low Impact Development) implementato dal software US EPA SWMM5 per modellare la risposta idrologica di 4 tetti verdi in scala ridotta. [Zhang and Guo \(2013\)](#) propongono un modello probabilistico fisicamente basato per la valutazione della risposta idrologica media nel lungo termine. [Locatelli et al. \(2014\)](#) stimano la ritenzione dei tetti verdi sia in continuo che per i singoli eventi mediante l'utilizzo di un modello concettuale a serbatoio non-lineare a 5 parametri. Il modello viene calibrato e validato utilizzando i dati sperimentali di 3 tetti verdi in scala reale di tipo estensivo con copertura a sedum. L'ET viene calcolata sulla base dell'equazione di Penman-Monteith ([Allen et al., 1998](#)) corretta con un coefficiente colturale pari a 0.6.

Alcuni studi si sono focalizzati o sulla misura o sulla modellazione dell'evapotraspirazione. [Köhler \(2004\)](#) effettua il bilancio idrologico dei tetti verdi mediante l'ausilio di lisimetri a pesata. Più recentemente [Berghage et al. \(2009\)](#) e [Voyde et al. \(2010a\)](#) utilizzano delle celle di carico per stimare il volume di acqua evapotraspirato in box con differenti specie vegetali e condizioni climatiche controllate. In questi studi viene dimostrato che il volume di acqua persa per ET è massimo quando il suolo è saturo e tende progressivamente a diminuire con il ridursi dell'umidità nel suolo. [Voyde et al. \(2010a\)](#) sottolineano che l'evapotraspirazione varia sia in funzione delle specie vegetali che in funzione della disponibilità idrica del substrato e forniscono delle relazioni empiriche per modellare il decadimento nel tempo. [Stovin et al. \(2013\)](#) dimostrano che sono le condizioni di umidità iniziale del substrato che enfatizzano le differenze tra ETp (Evapotraspirazione potenziale) e ETa (Evapotraspirazione reale o attiva). [Kasmin et al. \(2010\)](#) e [Nagase and Dunnett \(2010\)](#) hanno dimostrato che i metodi tradizionalmente utilizzati in agricoltura per la stima dell'ET possono essere adattati ed applicati nel campo dei tetti verdi. Tuttavia la letteratura scientifica internazionale ancora non contiene informazione inerenti i coefficienti colturali da utilizzare per tenere conto delle diverse tipologie di piante e delle differenze tra i substrati ed i suoli tradizionali. Recentemente, alcuni autori ([Coutts et al., 2013](#)) utilizzano una camera atmosferica sigillata e posata

su un tetto verde in scala reale per quantificare l'ETa di un tetto a sedum. Agli studi di tipo ingegneristico sui tetti verdi si contrappongono quelli di biologi ed agronomi che evidenziano come sia nei tetti verdi che nei suoli tradizionali la fisiologia delle piante influenza i processi evapotraspirativi ed in particolare la traspirazione nelle specie CAM (Nagase and Dunnett, 2010, 2012), alla quale appartiene il sedum, risulta per vari motivi da tre a cinque volte più bassa di quella delle piante aventi diverse vie metaboliche (Nobel, 1988). Gli studi più recenti (Berretta et al., 2014b), sottolineano come la variazione di umidità nel substrato in tempo secco dipende dalle caratteristiche delle piante, dalle proprietà fisiche del substrato e dalle condizioni meteo. Berretta et al. (2014b) sottolineano inoltre come le condizioni climatiche sono spesso di difficile riproduzione sia in laboratorio che nelle camere climatiche e conclude il suo studio fornendo un modello idrologico basato sul bilancio idrico che consente di stimare l'ETa in funzione della ETp, di una funzione di estrazione dell'umidità dal suolo e di un coefficiente correttivo, calibrato e validato sulla base di 15 mesi di osservazioni condotte su modelli di 3 m² di tetto verde soggetti agli agenti atmosferici naturali.

Lo studio della letteratura ha evidenziato come si sia passati da una prima fase in cui sono stati proposti diversi modelli per la stima della relazione afflussi/deflussi ad una seconda in cui si è cercato di stimare la relazione tra umidità del suolo, evapotraspirazione e deflusso. Diversi studi sottolineano (Berndtsson, 2010; Berretta et al., 2014b; Burszta-Adamiak and Mrowiec, 2013; Locatelli et al., 2014; Stovin et al., 2013) come l'evapotraspirazione rappresenti il parametro chiave nelle simulazioni in continuo in quanto è il processo che riduce il contenuto di umidità nel suolo modificando dunque le condizioni iniziali del substrato e conseguentemente la ritenzione. Partendo da questo presupposto il presente lavoro si pone l'obiettivo di individuare uno strumento modellistico che: (1) consenta di modellare e stimare l'evapotraspirazione media giornaliera in funzione di un numero limitato di parametri meteoroclimatici e di alcuni coefficienti (caratteristici delle colture) ottenuti per calibrazione del modello con i dati sperimentali e (2) implementare e calibrare un modello numerico mediante il software SWMM con il quale effettuare simulazioni in continuo (12 mesi).

5.2 Richiamo teorico

Il termine Evapotraspirazione è universalmente utilizzato per esprimere il volume di acqua che evapora dalla superficie del terreno e traspira attraverso gli apparati fogliari delle piante verso l'atmosfera. Nella pratica non è importante individuare la quotaparte

attribuibile a ciascun fenomeno ma stimarla nella sua interezza. A parità di altre condizioni, al crescere della disponibilità dell'acqua nel suolo crescerà il valore dell'evapotraspirazione, ma questo non indefinitamente infatti esiste un valore limite di evapotraspirazione che può essere superato anche per maggiori disponibilità di acqua. Tale valore limite noto con il nome di Evapotraspirazione potenziale (Potential evapotranspiration, ET_p) incorpora i volumi persi per evaporazione e traspirazione e si verifica solamente quando la disponibilità di acqua nel suolo e nelle piante è illimitata e gli stomi della vegetazione sono aperti (Eagleson, 1970). La ET_p esprime dunque la quantità di acqua (riferita all'unità di tempo) che si perderebbe per evapotraspirazione se ci si riferisse ad un suolo ideale in grado di attingere un illimitato rifornimento di acqua dal suolo profondo ed in condizioni di equilibrio con le assegnate condizioni atmosferiche. L'evapotraspirazione reale (ET_a), talvolta chiamata anche evapotraspirazione attuale è in genere inferiore al valore limite dato dall'evapotraspirazione potenziale. Secondo Zhao et al. (2013), nella loro revisione dei metodi per la stima dell'evapotraspirazione nei modelli idrologici, l' ET reale è da considerarsi il processo chiave dell'idrologia in quanto è l'unico parametro in grado di collegare il bilancio idrologico ed il bilancio energetico del suolo.

Nei modelli idrologici si possono individuare due gruppi di metodi per la stima della ET_a : il primo gruppo stima separatamente il contributo fornito dall'evaporazione dell'acqua dal suolo e dagli specchi liquidi e la traspirazione delle piante, integrandoli in un secondo tempo per definire un tasso di evapotraspirazione in funzione dell'uso del suolo; il secondo gruppo stima l' ET_p e successivamente la converte in ET_a mediante l'utilizzo di una funzione di estrazione dell'umidità dal suolo (Soil moisture extraction function, SMEF) (Zhao et al., 2013). La seconda famiglia di modelli dimostrano una forte capacità di adattamento e richiedono un numero limitato di variabili in ingresso, per questo motivo sono quelli maggiormente utilizzati nel campo della modellazione idrologica. Nel presente studio verranno presi in considerazione unicamente i modelli appartenenti alla seconda famiglia in cui la ET_p al generico tempo t può essere espressa mediante la seguente equazione fornita da Zhao et al. (2013):

$$ET_a = ET_p \left(\frac{\theta}{\theta_{FC}} \right) \quad (5.1)$$

in cui θ è il contenuto di umidità del suolo al tempo t e θ_{FC} rappresenta la capacità di campo mentre il loro rapporto rappresenta la funzione (soil moisture extraction function, SMEF) di estrazione dell'umidità del suolo.

5.3 Modellazione del decadimento dell'umidità del suolo in tempo secco nei tetti verdi

L'evapotraspirazione é il processo fisico attraverso il quale si determina la migrazione dell'acqua contenuta nel suolo e nelle piante verso l'atmosfera. Gli studi che al giorno d'oggi si sono focalizzati sulla modellazione dei processi evapotraspirativi nei tetti verdi sono un numero ridotto ([Berretta et al., 2014b](#); [Stovin et al., 2013](#)). Entrambi basano le loro considerazioni su una dettagliata e continua campagna sperimentale condotta tuttavia non su modelli in scala reale, ma su modelli fisici in scala ridotta ($3m^2$) sopraelevati rispetto al tetto dell'edificio e quindi a diretto contatto con l'aria non solo all'interfaccia atmosfera-vegetazione, ma anche nella parte inferiore. Inoltre entrambi gli studi si riferiscono ad esperimenti condotti in Gran Bretagna.

Le lacune della letteratura nel campo della modellazione dei processi evapotraspirativi nei tetti verdi hanno indirizzato la presente ricerca, in analogia con quanto fatto da [Stovin et al. \(2013\)](#) e da [Berretta et al. \(2014b\)](#), sull'attività di modellazione delle variazioni di umidità del suolo. Lo studio si é focalizzato sull'analisi delle variazioni del contenuto di umidità nel suolo in tempo secco e sulla possibilità di modellare queste variazioni con un semplice modello idrologico basato sul bilancio idrico, sulla stima della ET_p e su una funzione di estrazione dell'umidità dal suolo.

L'equazione di bilancio idrologico viene usualmente descritta dalla seguente equazione:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = P - R - ET_a \quad (5.2)$$

in cui $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ rappresenta le variazioni di contenuto volumetrico di acqua nel suolo, P , R e ET_a corrispondono rispettivamente al volume di precipitazione, al volume defluito e ai volumi persi per evapotraspirazione. Se ci si focalizza sui periodi di tempo secco é possibile trascurare i termini relativi alle precipitazione (P) ed al deflusso (R).

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = ET_a \quad (5.3)$$

Alla luce di queste considerazioni si é optato per esprimere l'evapotraspirazione attuale (eq. 5.4) unicamente in funzione della ET_p e della funzione SMEF proposta da [Zhao et al. \(2013\)](#) come precedentemente effettuato da ([Stovin et al., 2013](#)).

$$ET_a = ET_p * \frac{\theta}{\theta_{FC}} \quad (5.4)$$

Le formule utilizzate per la stima della ET_p sono molteplici (Zhao et al., 2013), alcuni di esse corrispondono a metodi empirici altre, come l'equazione derivata da Penman (1948) sono fisicamente basate.

Nel presente studio, la ET_p verrà determinata sia mediante la formulazione di FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998) che quella di Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985). La formulazione di Hargreaves and Samani (1985) (eq. 5.5) consente la determinazione della ET_p giornaliera rispetto a una superficie vegetata standard unicamente in funzione di un parametro climatico (temperatura) e della radiazione solare netta che viene stimata in funzione della latitudine e del giorno dell'anno. È una formulazione molto semplice che nel corso degli anni si è affermata poiché richiede un numero ridottissimo di parametri (temperatura massima e minima giornaliera, latitudine).

$$ET_p = 0.00023 * RA * \sqrt{TD} * (T + 17.8) \quad (5.5)$$

in cui RA è la radiazione solare extraterrestre che deve essere espressa nella stessa unità con cui si esprime Etp , TD rappresenta la differenza tra la massima e la minima temperatura mensile e T è la temperatura dell'aria espressa in °C. Zhao et al. (2013) sottolineano come questa equazione, che si basa su un bilancio energetico sia particolarmente idonea per la stima dell' ET_p in climi aridi e semi-aridi o nelle distese erbose. Il modello FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998) è il modello raccomandato dalla FAO e dalla World Meteorological Organization (WMO) per stimare la ET_p rispetto ad una superficie caratterizzata da una copertura vegetale standard.

$$ET_p = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (5.6)$$

dove: ET_p = evapotraspirazione di riferimento in $mm/giorno$; R_n = radiazione netta sulla superficie vegetata $MJm^{-2}d^{-1}$ stimata dalla radiazione globale; G = Flusso di calore nel suolo $MJm^{-2}d^{-1}$; T = temperatura dell'aria °C; u_2 = velocità del vento m/s a 2 m dal suolo; $(e_s - e_a)$ = deficit di saturazione kPa stimato da U_{rmax} , U_{rmin} , T_{max} e T_{min} Δ = pendenza della curva di pressione $kPa/°C$ γ = costante psicrometrica $kPa/°C$.

L'equazione 5.6 si riferisce ad una superficie standard descritta nel rapporto FAO 56 come segue: "A hypothetical reference crop with an assumed crop height of 0.12 m, a fixed surface resistance of 70 sm^{-1} and an albedo of 0.23".

La presente equazione viene riconosciuta a livello internazionale come l'equazione con la quale si riesce a determinare l' ET_p rispetto ad una superficie di riferimento senza

incorrere in ambiguità in qualunque regione e clima (Allen et al., 1998). Una volta determinata l'ETp mediante le due formulazioni sopracitate esse verranno integrate nel modello in cui la condizione iniziale di umidità del suolo verrà fissata pari al dato misurato all'inizio di ogni serie di tempo secco analizzata. Il modello è stato implementato con un time step orario. La ETp è stata calcolata utilizzando i parametri meteorologici ricavati dalla stazione meteo: temperatura massima e minima giornaliera, radiazione solare, velocità del vento ed umidità relativa. La ETp è stata assunta pari alla ETp giornaliera diviso 24 ore. La presente semplificazione non consente la modellazione delle variazioni giornaliere ma le differenze nel lungo periodo non sono rilevanti. Il modello sviluppato in ambiente R (<http://www.r-project.org/>) si appoggia al pacchetto SPEI (Bequería and Vicente-Serrano, 2013) per la stima dell'evapotraspirazione potenziale. La bontà del modello è stata determinata sia mediante considerazioni grafiche che attraverso l'utilizzo di 3 statistiche quantitative: Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), la percentuale bias (PBIAS) e dal rapporto dell'errore quadratico medio e la deviazione standard (RSR) come raccomandato da Moriasi et al. (2007). Il parametro Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) espresso da Nash and Sutcliffe (1970) come:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right] \quad (5.7)$$

In cui n è il numero complessivo di osservazioni, Y_i^{obs} è il valore della variabile osservata, Y_i^{mod} è il corrispondente valore della variabile modellata e Y_i^{mean} è il valore medio dei valori osservati. Il coefficiente di adattamento del modello NSE è una misura che indica quanto il rapporto tra i valori osservati e simulati si avvicina alla linea di regressione lineare a 45°. Il parametro NSE può variare da $-\infty$ a 1.0 incluso, con NSE=1 valore ottimale. I valori nell'intervallo 0-1 sono generalmente considerati ottimali mentre valori negativi indicano che il valore medio è un predittore migliore.

Il parametro Percent bias (PBIAS) misura la tendenza dei dati simulati di essere maggiori o minori dei corrispondenti dati osservati (Gupta et al., 199). Il valore ottimo è 0, un valore positivo indica la tendenza a sovrastimare, mentre un valore negativo indica la tendenza a sottostimare. Il PBIAS viene calcolato mediante la seguente equazione:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (5.8)$$

in cui i simboli assumono lo stesso significato di quelli precedentemente descritti per l'NSE. Il PBIAS ha la capacità di individuare chiaramente i modelli caratterizzati da prestazioni minime (Gupta et al., 1999). Valori di PBIAS $\leq \pm 10\%$ indicano un modello molto buono mentre valori PBIAS $\leq \pm 15\%$ indicano che il modello è da considerarsi ancora buono. Il parametro RSR (observations standard deviation ratio) è un indice comunemente utilizzato in statistica per esprimere il rapporto tra l'errore quadratico medio (RMSE) e la deviazione standard (STDEV):

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mod})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right]} \quad (5.9)$$

Il parametro RSR varia tra il valore ottimale corrispondente a 0 ed un qualunque valore positivo. Maggiore è il valore assunto da RSR minore è la prestazione del modello. I presenti parametri sono stati utilizzati per valutare le prestazioni generali dei modelli proposti e per determinare una curva dei coefficienti colturali (K_c) caratteristico della vegetazione sedum. Secondo quanto indicato dal rapporto FAO 56 Allen1998 la curva dei coefficienti colturali consente di trasformare l'ET_p, che si riferisce ad una coltura standard, in ET_a. La curva dei coefficienti colturali può essere rappresentata come una serie costituita da 4 segmenti lineari che rappresentano le fasi vegetative della pianta durante l'anno (Allen et al., 1998; Pereira et al., 2015). I coefficienti colturali nelle diverse stagioni sono stati calcolati mediante l'ausilio dei parametri statistici sopracitati ed introdotti nella seguente equazione:

$$ET_a = ET_p * K_c * \frac{\theta}{\theta_{FC}} \quad (5.10)$$

5.3.1 Metodi

La necessità di ottenere un bilancio idrologico non influenzato né dalla precipitazione (P) né dal deflusso (R) ha determinato la scelta di soffermarsi sull'analisi dei periodi di tempo secco. Dal 31/05/2014 al 31/01/2015 i giorni di tempo secco sono stati 166. Le serie di tempo secco (dry weather periods, DWP) più lunghe si sono registrate nei mesi di settembre-ottobre (9 giorni), nei mesi di novembre-dicembre (19 giorni) e a gennaio 2015 (15 giorni). Poiché lo scopo della presente ricerca è stimare l'evapotraspirazione quando il bilancio idrologico è influenzato unicamente dall'evapotraspirazione si è scelto di analizzare le serie di DWP avendo cura di avere una panoramica delle diverse condizioni climatiche e serie sufficientemente lunghe (più di una settimana). Tale scelta si discosta da quella effettuata da [Berretta et al. \(2014b\)](#) in cui sono stati analizzati DWP pari o superiori a 10 giorni. Si è tuttavia ritenuto che si fossero considerate unicamente le serie superiori ai 10 giorni (3) si sarebbero perse delle importanti informazioni legate al clima e quindi al comportamento della vegetazione in diversi momenti dell'anno. La tabella 5.1 illustra tutte le serie di DWP con durata superiore ai 7 giorni registrate da Maggio a fine Gennaio. Il DWP (12 giorni) iniziato il 01 Giugno 2014 è stato scartato a causa di un malfunzionamento della stazione Hobo protrattosi per alcuni giorni.

Tra i DWP disponibili ne sono stati selezionati 6 (tabella 5.2) avendo cura di avere

Inizio	Fine	Durata [giorni]	Temp. media [°C]	T. max [°C]	T. min [°C]
31/05/2014*	12/06/2014	12	22.48	38.92	11.23
17/06/2014	24/06/2014	7	24.5	35.46	14.83
30/06/2014	07/07/2014	7	25.37	35.95	16.17
06/08/2014	13/08/2014	7	27.93	38.45	17.92
24/08/2014	31/08/2014	7	24.43	35.06	16.12
21/09/2014	30/09/2014	9	19.75	30.54	8.9
03/10/2014	10/10/2014	7	18.62	28.03	11.23
16/10/2014	04/11/2014	19	10.44	29.53	4.24
08/12/2014	15/12/2014	7	7.44	17.78	1.6
18/12/2014	26/12/2014	8	5.9	16.28	0.89
04/01/2015	19/01/2015	15	5.6	20.25	-0.3

TABELLA 5.1: Serie di DWP con lunghezze superiori ai 7 giorni disponibili. La serie contrassegnata con * è parziale a causa di un mal funzionamento della stazione meteo.

una panoramica delle diverse condizioni climatiche e di differenti contenuti di umidità del suolo iniziali. I grafici illustrati in Fig. 5.1 mostrano le variazioni di umidità nel suolo durante il periodo estivo (Giugno-Agosto) del 2014 per i DWP 1, 2 e 3. Il DWP1 ed il DWP2 sono caratterizzate da valori di θ (contenuto d'acqua volumetrico) iniziali di circa 0.29 v/v e temperatura massima dell'aria intorno ai 35 °C. Rappresentano

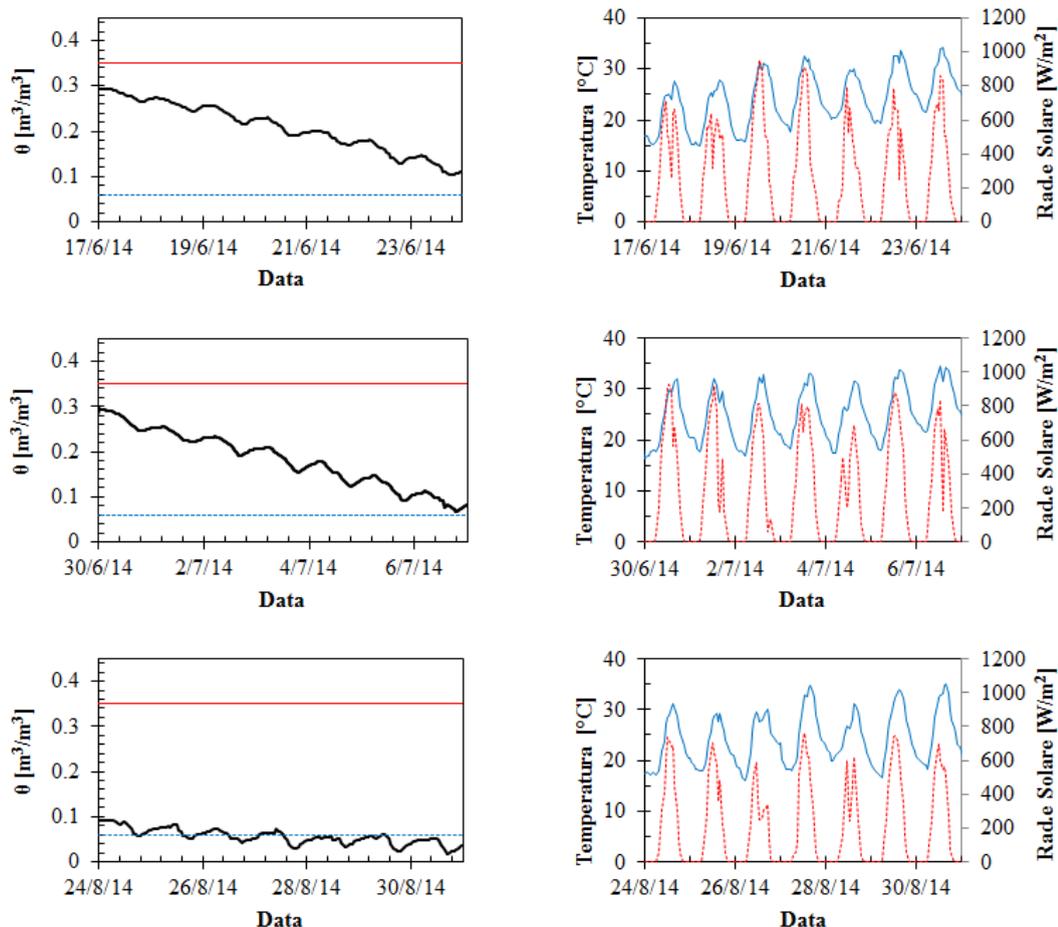


FIGURA 5.1: Serie di DWPs (Giugno-Agosto) analizzati. Nei grafici a sinistra viene illustrata la variazione di umidità nel suolo (linea nera), la capacità di campo (linea rossa) e il punto di appassimento (linea blu). Nei grafici di destra sono rappresentati la temperatura dell'aria (linea blu) e la radiazione solare (linea rossa) durante i DWPs.

dunque una la condizione media del suolo immediatamente dopo un temporale estivo. L'umidità del suolo tende a calare con trend costante, sono tuttavia ben visibili le fluttuazioni diurne dovute al recupero di umidità notturno, causato dalla rugiada che tendono ad essere tanto maggiori quanto più alto è il contenuto di umidità iniziale. Il DWP3 corrisponde al periodo più arido dell'intera estate come dimostrato anche dal basso valore di θ iniziale ($0.06 v/v$). I grafici a destra di ciascun DWP illustrano i valori medi orari di temperatura (linea blu) e radiazione solare (linea rossa). È evidente come il picco di temperatura giornaliera sia conseguente al picco di radiazione solare e come le variazioni nel contenuto di umidità del suolo rispecchino l'andamento di temperatura e radiazione solare. I DWPs 3, 4 e 5, illustrati in Fig. 5.2, mettono in luce come nel passare dalla fine dell'estate al pieno inverno viene mantenuto un trend decrescente di umidità, tuttavia i grafici evidenziano come le fluttuazioni giornaliere si riducano progressivamente a causa dell'abbassarsi delle temperature e del ridursi della radiazione solare. La radiazione solare influenza i ritmi biologici delle piante a causa dell'altera-

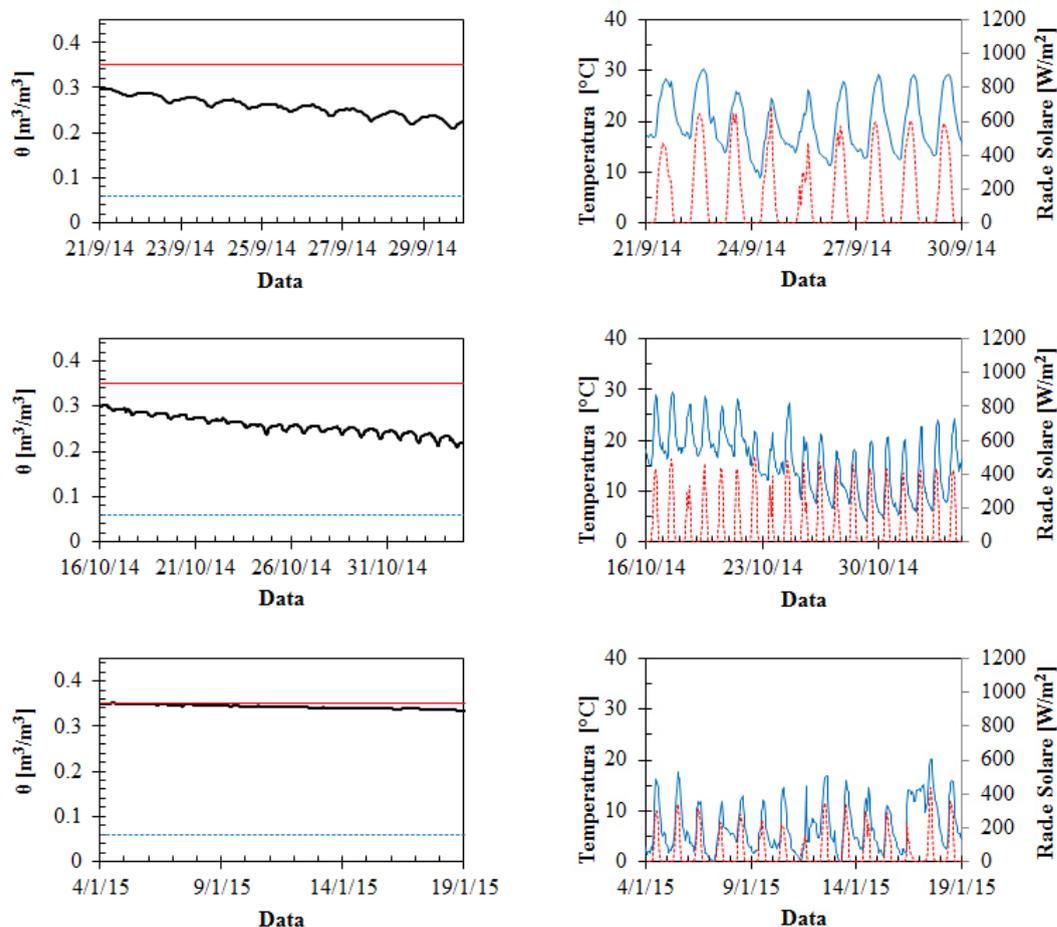


FIGURA 5.2: Serie di DWPs (Settembre-Gennaio) analizzati. Nei grafici a sinistra viene illustrata la variazione di umidità nel suolo (linea nera), la capacità di campo (linea rossa) e il punto di appassimento (linea blu). Nei grafici di destra sono rappresentati la temperatura dell'aria (linea blu) e la radiazione solare (linea rossa) durante i DWPs.

Parametri	DWP1	DWP2	DWP3	DWP4	DWP5	DWP6
Inizio	17/06/2014	30/06/2014	24/08/2014	21/09/2014	16/10/2014	04/01/2015
Fine	24/06/2014	07/07/2014	31/08/2014	30/09/2014	04/11/2014	19/01/2015
Durata	7	7	7	9	19	15
θ [m^3/m^3]	0.29	0.30	0.06	0.30	0.28	0.35
Median	2.41	2.97	0.55	0.82	0.39	0.10
Mean	2.24	2.47	0.54	0.71	0.43	0.10
Max.	3.16	3.33	1.06	1.04	1.17	0.17
sd	0.98	1.13	0.37	0.29	0.29	0.04

TABELLA 5.2: DWPs analizzati e corrispondenti valori iniziali di umidità (θ) e mediana, valore medio, valore massimo e deviazione standard delle perdite giornaliere di umidità nel suolo in *mm*.

zione del rapporto fotosintesi/respirazione. La riduzione delle fluttuazioni giornaliere è dunque presumibilmente imputabile allo stato di quiescenza invernale progressiva del sedum. Tale fenomeno, percepibile visivamente a causa delle variazioni di colore delle piante come evidenziato in Fig. 5.3, comporta inoltre una riduzione della massa vegetale fotosinteticamente attiva. Alla quiescenza invernale delle piante corrisponde una traspirazione praticamente nulla come evidenziato dal DWP6 (Fig. 5.2) in cui il contenuto di umidità del suolo è sempre prossimo alla capacità di campo. I DWPs



FIGURA 5.3: Le foto evidenziano due periodi della fase vegetativa del sedum: la fase estiva caratterizzata da un colore verde brillante e la fase invernale caratterizzata da un colore tendente al rosso.

analizzati mostrano che a parità di stato vegetativo le variazioni diurne di umidità nel suolo sono fortemente influenzate dal valore iniziale di θ e sono tanto maggiori quanto maggiore è la disponibilità idrica. Durante il periodo invernale invece, nonostante la disponibilità idrica sia massima, la combinazione tra quiescenza invernale delle piante, temperature rigide, elevata umidità dell'aria e ridotta radiazione solare comporta una riduzione progressiva delle fluttuazioni giornaliere che tendono ad essere quasi nulle nel mese di Gennaio. I grafici in Fig. 5.4 mostrano le perdite giornaliere in $mm/giorno$ misurate durante i 6 periodi di monitoraggio (il valore medio e massimo, la mediana e la deviazione standard sono riportate in tabella 5.2) ed i relativi dati climatici. I grafici evidenziano come il valore di perdita media giornaliera di umidità nel suolo oscilli tra i $0.10 mm/giorno$ durante il periodo invernale al valore massimo di $3.33 mm/giorno$ registrato durante il mese di luglio. I valori misurati durante il periodo invernale sono compatibili con quelli misurati da altri autori (Berretta et al., 2014a) mentre quelli estivi corrispondono a quelli misurati in Nuova Zelanda nella stagione estiva da Voyde et al. (2010b) e a circa il doppio dei valori medi misurati in Gran Bretagna nello stesso periodo da Berretta et al. (2014a). Tale differenza è principalmente attribuibile alla maggiore radiazione solare e alla maggiore temperatura registrata nel caso studio italiano. Risulta interessante notare come, a parità di condizioni meteo nel DWP2 si è misurato una perdita giornaliera di umidità dal suolo 4,5 volte maggiore che nel DWP3. Questo

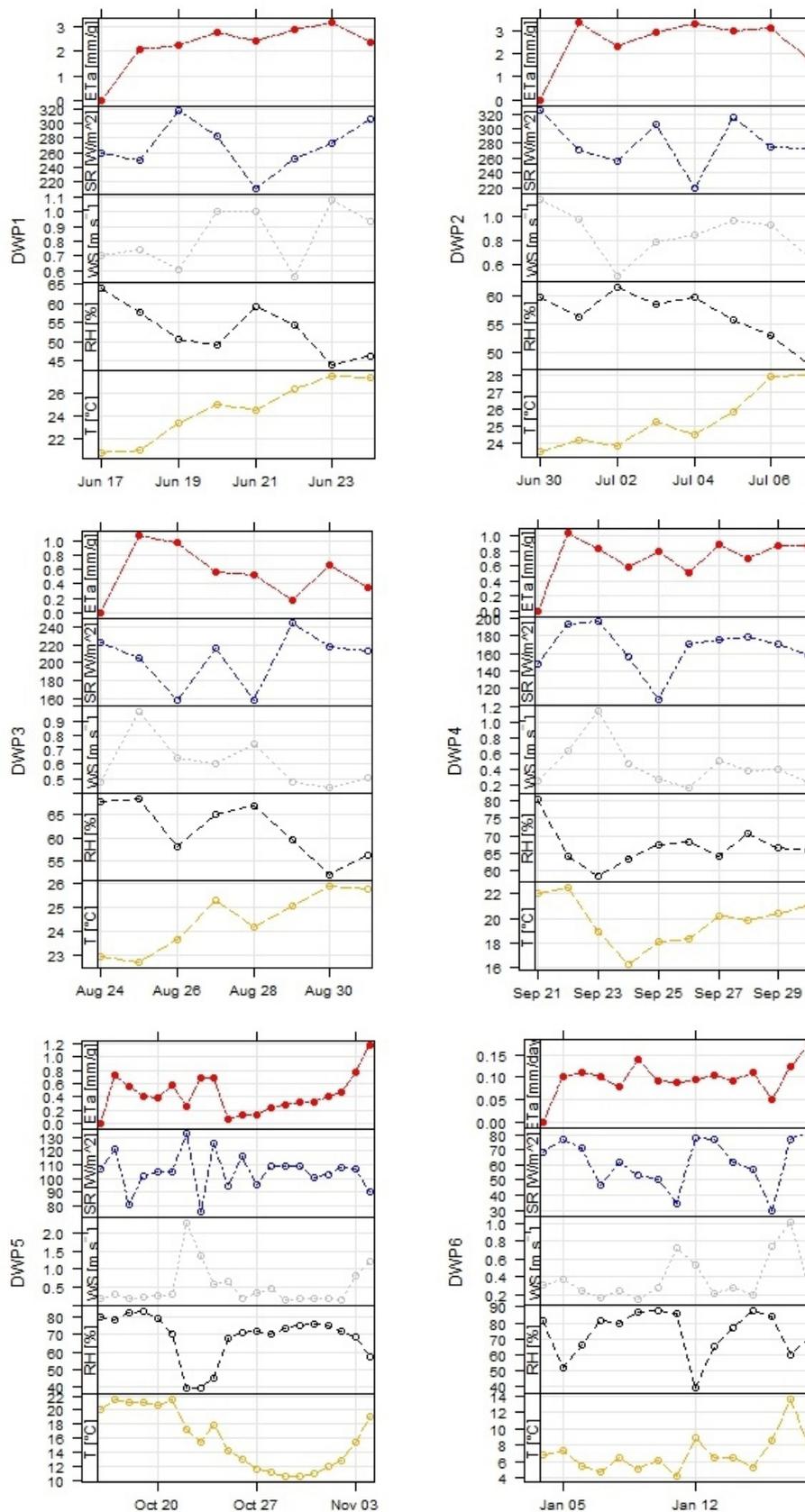


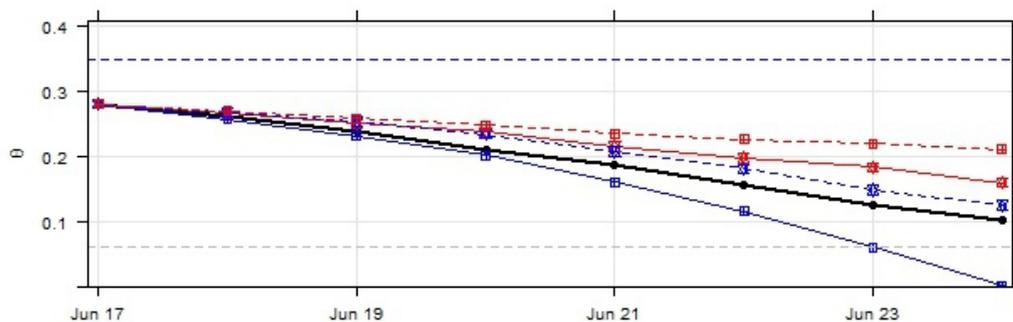
FIGURA 5.4: Perdita diurna per Evapotraspirazione nei DWPs selezionati e parametri climatici medi giornalieri osservati: radiazione solare (RS), velocità del vento (WS), umidità dell'aria (RH) e temperatura (T).

dato conferma dunque che il tasso di perdita giornaliera di umidità dal suolo é fortemente influenzata dal contenuto iniziale di umidità. Dal raffronto dei tassi di perdita di umidità misurati nel periodo estivo e quelli misurati nel periodo invernale si evince che a parità di condizioni climatiche il tasso di perdita di umidità dipende unicamente dal θ iniziale. Nel passare invece dai periodi caldi estivi a quelli freddi invernali a parità di θ iniziale il tasso di perdita di umidità dipende sia dalle condizioni meteorologiche che dall'eventuale stato di quiescenza invernale delle piante.

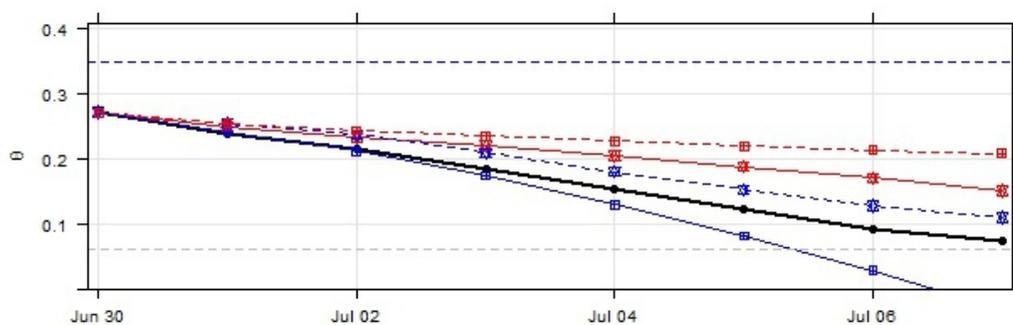
5.3.2 Risultati

La variazione su scala diurna dell'umidità del suolo é stata inizialmente modellata mediante l'utilizzo dell'equazione (5.3) utilizzando sia la formulazione di Hargreaves sia l'equazione FAO 56 di Penman-Monteith per la stima della ETp (Modello 1). Nel secondo modello (Modello 2) il calo di umidità nel suolo é stato simulato includendo la funzione SMEF (descritta nell'equazione (5.4)) ed infine quest'ultima equazione é stata sostituita dalla (5.10) che costituisce l'ultimo modello (Modello 3) ed include i coefficienti colturali ottenuti mediante ottimizzazione dell'indice di efficienza di Nash e Sutcliffe (NSE). La procedura di ottimizzazione é stata effettuata con time step orario per ciascuno dei DWP analizzati (tabella 5.1) confrontando i dati osservati con quelli ottenuti dal modello.

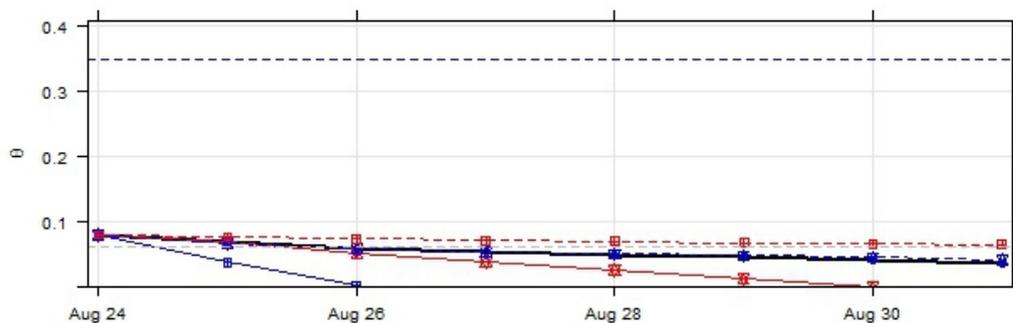
La Fig. 5.5 e la Fig. 5.6 mostrano i risultati dell'implementazione del Modello 1 e del Modello 2 in cui la ETp é stata espressa sia mediante la formulazione di Hargreaves (Ha) che con la FAO 56 di Penman-Monteith (PM). In particolare la linea nera rappresenta il dato misurato (media giornaliera), le linee continue mostrano i risultati del Modello 1 e le linee tratteggiate i risultati del Modello 2. L'utilizzo della formulazione FAO 56 per la stima dell'evapotraspirazione potenziale comporta generalmente una sovrastima del contenuto di umidità durante la stagione estiva e una sottostima durante la stagione fredda. Il Modello 1 in cui ETp viene calcolata con la formula di Hargreaves mostra generalmente i risultati peggiori in quanto la semplicità del modello, non tenendo in considerazione l'effetto della ridotta umidità, determina una sovrastima delle perdite giornaliere. É tuttavia visibile come l'applicazione a questo modello della funzione SMEF ne determina un miglioramento come dimostrato anche dagli indici in tabella 5.3. Risulta tuttavia evidente che il tetto verde presenta un comportamento fortemente influenzato dalla stagionalità per cui la variazione di umidità nel suolo risente sia delle condizioni iniziali (vedi confronto tra DWP2 e DWP3) che dalle condizioni climatiche. In particolare sia il Modello 1 che il Modello 2 sono capaci di riprodurre meglio l'andamento dell'umidità durante il periodo estivo che nel periodo invernale. L'indice PBIAS durante il periodo invernale, per il Modello 2 nelle due formulazioni é sempre negativo,



(a) DWP1: 17-24 giugno 2014



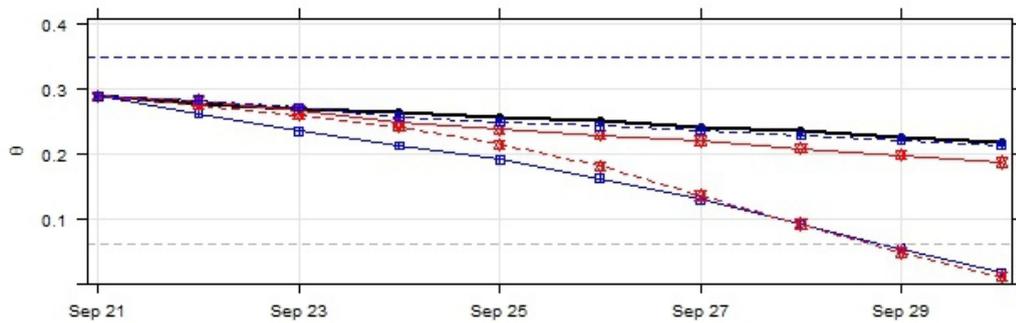
(b) DWP2: 30 giugno- 7 luglio 2014



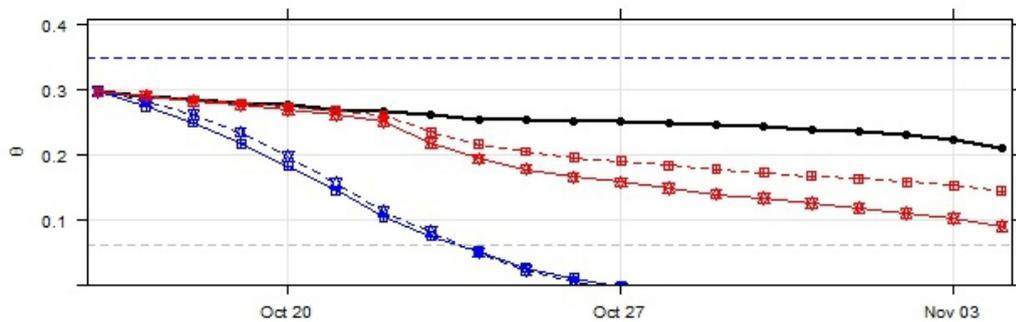
(c) DWP2: 30 giugno- 7 luglio 2014

- Misurato
- Mod Ha
- - - ■ - - - Mod Ha*SMEF
- ×— Mod PM
- - - ■ - - - Mod PM*SMEF

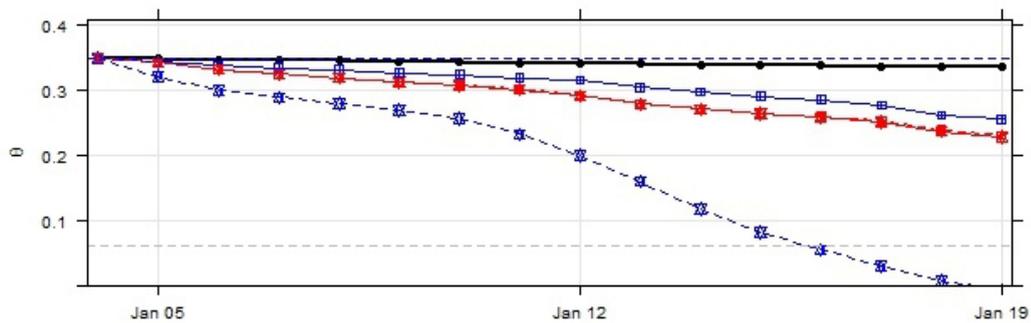
FIGURA 5.5: Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP1, DWP2 e DWP3. Le linee orizzontali blu e grigia rappresentano la capacità di campo e il punto di appassimento.



(a) DWP4: 21-30 settembre 2014



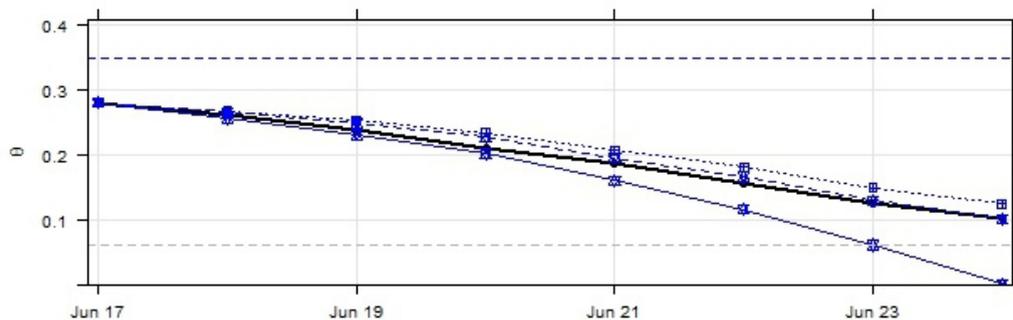
(b) DWP5: 16 ottobre-4 novembre 2014



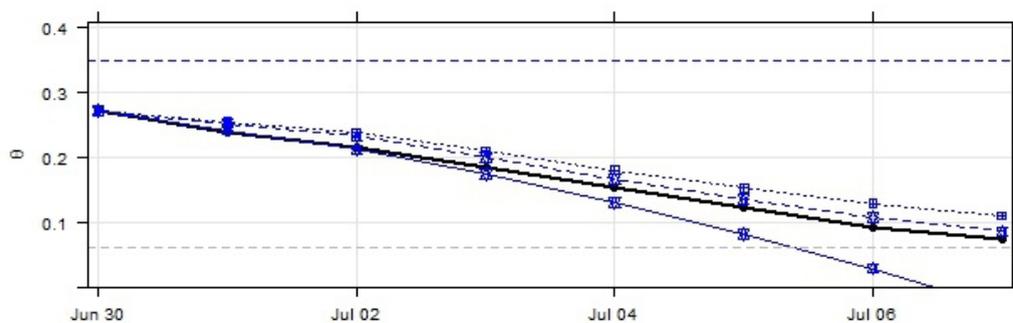
(c) DWP6: 4-19 gennaio 2015

- Misurato
- Mod Ha
- - -■- Mod Ha*SMEF
- Mod PM
- - -■- Mod PM*SMEF

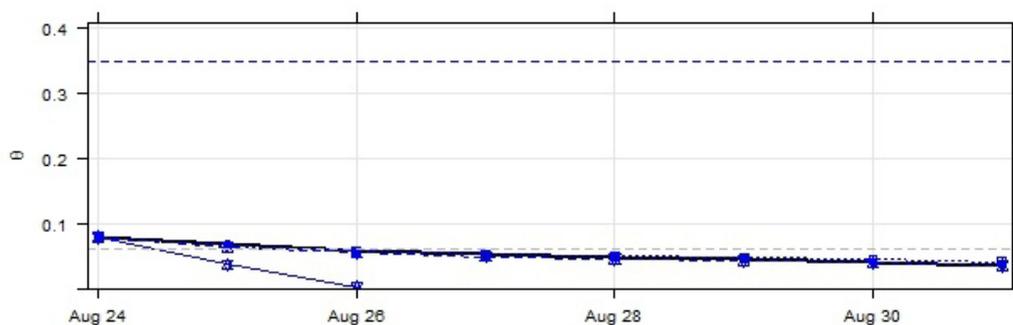
FIGURA 5.6: Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP3, DWP4 e DWP5. Le linee orizzontali blu e grigia rappresentano la capacità di campo e il punto di appassimento.



(a) DWP1: 17-24 giugno 2014



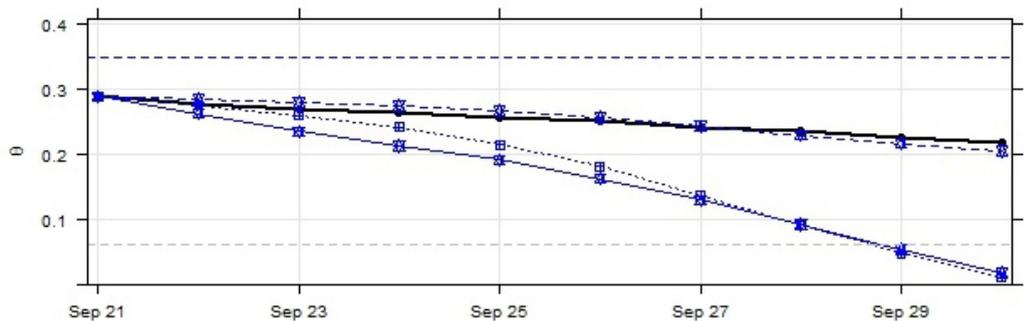
(b) DWP2: 30 giugno- 7 luglio 2014



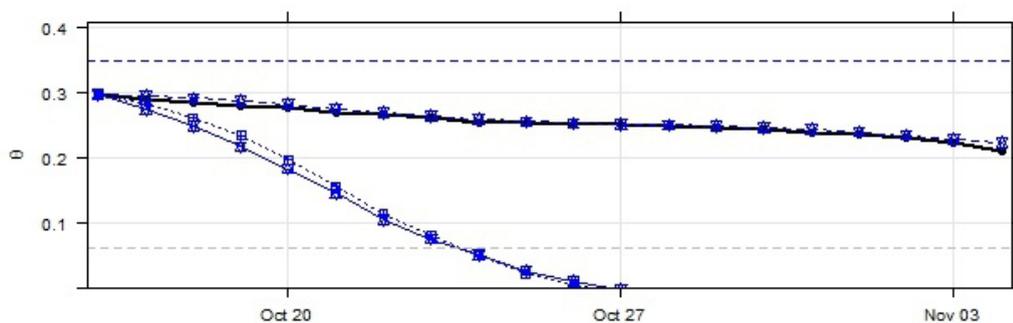
(c) DWP3: 30 giugno- 7 luglio 2014



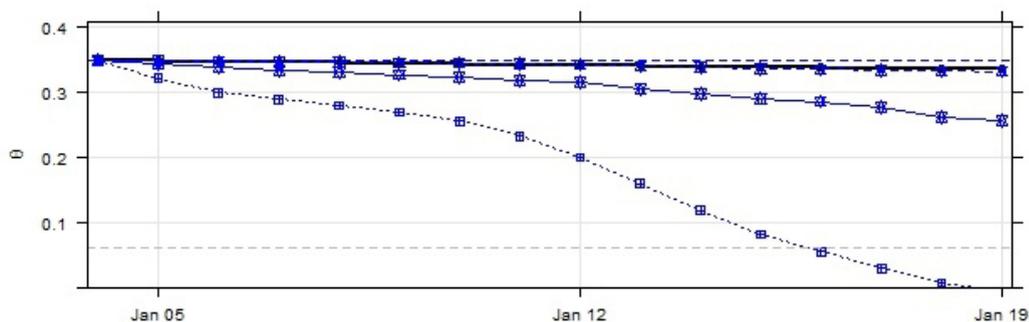
FIGURA 5.7: Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP1, DWP2 e DWP3. Le linee orizzontali blu e grigia rappresentano la capacità di campo e il punto di appassimento.



(a) DWP4: 21-30 settembre 2014



(b) DWP5: 16 ottobre-4 novembre 2014



(c) DWP6: 4-19 gennaio 2015

- Misurato
- Mod Ha
- ... Mod Ha*SMEF
- - Mod Ha*SMEF*Ks

FIGURA 5.8: Variazione del contenuto di umidità medio giornaliero misurato (θ) e modellato durante DWP3, DWP4 e DWP5. Le linee orizzontali blu e grigia rappresentano la capacità di campo e il punto di appassimento.

	NSE					
	Ha	PM	Ha*Smeff	PM*SMEF	Ha*SMEF*ks	PM*SMEF*ks
DWP1	0.65	0.41	0.9	-0.04	0.98	0.95
DWP2	0.41	0.5	0.84	-0.47	0.96	0.65
DWP3	-3.05	-71.38	0.96	-1.02	0.96	0.97
DWP4	0.17	-24.12	-22.99	0.93	0.86	0.93
DWP5	-12.38	-99.19	-115.78	-4.1	0.95	0.77
DWP6	-179.2	-81.13	-1907.56	-172.77	0.81	0.79
	PBIAS %					
	Ha	PM	Ha*Smeff	PM*SMEF	Ha*SMEF*ks	PM*SMEF*ks
DWP1	14.9	-16.2	8.8	24.9	3.5	-5.5
DWP2	25	-18.1	14.3	38.7	7.3	16.7
DWP3	-39.8	-184.6	2.7	32.6	-4.1	3.2
DWP4	-6.3	-35	-31	-1.5	0.6	-1.5
DWP5	-25.5	-76.9	-80.6	-15.5	1.7	3.5
DWP6	-14.7	-9.5	-46.3	-14.5	-0.2	0.5
	RSR					
	Ha	PM	Ha*Smeff	PM*SMEF	Ha*SMEF*ks	PM*SMEF*ks
DWP1	0.56	0.72	0.3	0.95	0.14	0.21
DWP2	0.72	0.66	0.37	1.13	0.19	0.56
DWP3	1.88	7.96	0.19	1.33	0.18	0.16
DWP4	0.86	4.75	4.65	0.25	0.36	0.25
DWP5	3.57	9.76	10.53	2.2	0.23	0.47
DWP6	13	8.77	42.3	12.76	0.43	0.44

TABELLA 5.3: Analisi statistica quantitativa dei modelli idrologici utilizzati per la modellazione del contenuto di umidità nel suolo. Le simulazioni evidenziate in grassetto mostrano risultati migliori.

ciò significa che il modello sottostima il contenuto di umidità a causa di una sovrastima delle perdite giornaliere per evapotraspirazione. I risultati del periodo estivo trovano conferma nella letteratura scientifica (Berretta et al., 2014b) mentre ad oggi non sono disponibili studi che mostrino le variazioni di umidità nel suolo in periodo invernale. Nelle fasi finali di implementazione del modello è stato introdotto un coefficiente di calibrazione colturale K_c (eq. 5.10). La Fig. 5.7 e la Fig. 5.8 mostrano come l'applicazione di tale coefficiente porti ad un sensibile miglioramento delle prestazioni del modello. Il coefficiente K_c è stato determinato indipendentemente per ogni DWP attraverso l'ottimizzazione del parametro NSE per entrambe le versioni del modello 3. Come si evince dalla tabella 5.4 i valori di K_c non sono costanti durante l'anno ma seguono un trend legato alla stagionalità della vegetazione. Il coefficiente di calibrazione K_c assume quindi un ruolo di coefficiente culturale, ovvero di un coefficiente che consente di tener conto delle differenze tra la coltura standard (caratterizzata da aspetto costante e completo grado di riempimento del suolo (Allen et al., 1998) alla quale si riferiscono le formule di Hargreaves e Penman-Monteith e la vegetazione presente sul tetto verde (sedum). Le variazioni caratteristiche del ciclo stagionale della piante durante l'anno (colore, massa, contenuto di acqua) condizionano i processi evapotraspirativi e di conseguenza il coefficiente K_c . I valori trovati infatti, corrispondono a valori molto bassi durante la stagione

	K_c	
	Hargreaves	Penamn-Monteith
Gennaio	0.05	0.15
Febbraio	0.05	0.15
Marzo	-	-
Aprile	-	-
Maggio	-	-
Giugno	1.15	2.5
Luglio	1.15	2.8
Agosto	1.15	3
Settembre	0.3	0.9
Novembre	0.15	0.5
Dicembre	0.05	0.15

TABELLA 5.4: Coefficienti di calibrazione colturali da applicare al Modello 3 quando l'ETp viene calcolata rispettivamente con la formula di Hargreaves e con la FAO 56 Penman-Monteith

invernale e tendono specularmente a decrescere (crescere) durante il passaggio dalla stagione estiva (invernale) alla stagione autunnale (primaverile).

I valori massimi di K_c si raggiungono durante il periodo estivo (giugno-agosto) quando il sedum raggiunge la piena fase di maturità (mid-season). I valori trovati in letteratura (Allen et al., 1998) mostrano che per $K_c(K_{c-mid})$, i coefficienti colturali tendono ad assumere i valori massimi e a essere costanti per molte specie vegetali e condizioni climatiche. Questo andamento, caratteristico della vegetazione in condizioni tradizionali, può dunque considerarsi affine a quanto trovato per il sedum in condizioni non standard (tetto verde).

Usualmente nel passaggio dalla fase di maturità alla fase di senescenza (lento processo involutivo fisiologico che segue l'età matura) si assiste ad una progressiva riduzione dell'efficienza della conduttività stomatale delle foglie. Questo processo fisiologico comporta un'altrettanto progressiva riduzione del coefficiente culturale che tende dunque a raggiungere valori prossimi allo zero come confermato anche dai dati sperimentali. Durante la fase di crescita che, per le colture stagionali inizia quando la copertura vegetale è maggiore del 10% e per le colture annuali inizia con la comparsa di nuove foglie, generalmente si assiste ad un progressivo incremento dell'attività evapotraspirativa. Attualmente non è stato possibile determinare i coefficienti colturali per il sedum durante questa fase ma si prevede di estendere la ricerca.

5.3.3 Conclusioni

La ricerca descritta in questa parte della tesi è stata incentrata sullo studio delle variazioni del contenuto di umidità nel substrato durante i periodi di tempo secco. L'analisi è stata supportata dai dati derivanti da 9 mesi di monitoraggio continuo del θ (volumetric water content) nel plot SR.

Nella prima parte sono stati analizzati i risultati della campagna di monitoraggio che mostrano che il contenuto di acqua immagazzinato nel substrato é caratterizzato da cicliche fluttuazione diurne causate dall'alternarsi del giorno e della notte a cui corrispondono variazioni nella radiazione solare e nella temperatura. I dati mostrano che l'ampiezza delle oscillazioni non é costante nel tempo ma varia in funzione, oltre che dei parametri meteorologici, anche del contenuto iniziale di acqua e dello stato vegetativo delle piante. Al tendere di θ verso il punto di appassimento si ha una riduzione delle fluttuazioni giornaliere come riscontrato anche in letteratura. A parità di contenuto iniziale di acqua le fluttuazioni giornaliere risultano fortemente influenzate dallo stato vegetativo delle piante raggiungendo i valori massimi nella fase riproduttiva primaverile e estiva e diminuendo progressivamente sino a raggiungere i valori minimi nella fase di senescenza invernale. Nella seconda parte i dati misurati sono stati comparati con i risultati di un primo modello ottenuto stimando l'ETa a partire dall ETp (sia attraverso la simulazione di Hargreaves che di Penman Monteith) attraverso l'applicazione di una funzione di estrazione dell'umidità dal suolo (SMEF) che includesse la condizione di umidità iniziale del substrato. I risultati hanno mostrato come l'applicazione di questa funzione porti ad un miglioramento della stima dell'ETa. Un ulteriore miglioramento del modello é stato ottenuto attraverso l' introduzione di coefficienti colturali mensili (K_C), ricavati a partire dai dati, che consentissero di includere nel modello lo stato vegetativo delle piante al momento della simulazione. L'utilizzo delle 2 diverse formulazioni per la stima dell'ETp hanno tuttavia portato all'individuazione di un doppio set di coefficienti colturali caratterizzati da medesimo andamento ma diverso valore assoluto.

5.4 Modellazione in continuo dei processi idrologici attraverso il codice di calcolo EPA SWMM

La revisione della letteratura scientifica ha mostrato come nel corso degli anni siano stati proposti diversi modelli per lo studio del bilancio idrologico dei tetti verdi. Una possibile alternativa a questo tipo di approccio è l'utilizzo di software come ad esempio Hydrus 1-D (Hakimdavar et al., 2014; Hilten et al., 2008; Palla et al., 2012), MIKE URBAN (Locatelli et al., 2014) o EPA'S SWMM (Alfredo et al., 2010; Bonoli et al., 2013; Burszta-Adamiak and Mrowiec, 2013; Maglionico et al., 2014; Qin et al., 2013). La crescente popolarità di questi software deriva dal fatto che consentono di valutare le prestazioni dei tetti verdi e di altre tecnologie LID (Low Impact Development) in regioni differenti da quelle in cui il modello è stato sviluppato ma soprattutto consentono di integrare i LID nei modelli che descrivono i sistemi di drenaggio urbano. Un altro possibile vantaggio deriva dal fatto che alcuni di essi sono open source e non-commerciali come ad esempio EPA SWMM. Perseguendo l'obiettivo di individuare uno strumento modellistico che potesse essere utilizzato dai progettisti per valutare le prestazioni di diverse configurazioni di tetti verdi si è implementato il modello del plot SR (sedum roof) e del plot RR (reference roof) presenti nel tetto verde sperimentale mediante il software SWMM (Version 5.1.007).

5.4.1 Implementazione del modello

SWMM (Storm Water Management Model), prodotto e sviluppato dal Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency (US-EPA), è un software che consente la modellazione in termini quantitativi e qualitativi di tutti i processi idrologici che si innescano in un bacino. Una dettagliata spiegazione dei processi e delle equazioni utilizzate in SWMM è contenuta nel manuale Rossman (2010). La versione precedente del modello SWMM è stata utilizzata da Alfredo et al. (2010) per simulare le prestazioni idrologiche di un tetto verde. Lo studio evidenziò che il modello SWMM tende a sottostimare il volume e le portate defluite dal tetto verde. Gli autori raccomandano inoltre di prestare attenzione ai risultati del modello quando questo non viene validato con dati sperimentali. A partire dalla versione 5.1 il software SWMM include un modulo chiamato LID (*Low Impact Development*) che consente la modellazione di tecnologie a basso impatto ambientale quali le pavimentazioni permeabili, i bacini di infiltrazione ed i tetti verdi. Nel modello i LID sono rappresentati come una combinazione di strati orizzontali le cui proprietà (spessore, porosità, conduttività idraulica etc) sono rappresentate per unità di area (Qin et al., 2013). I LID vengono usualmente sovrapposti ad una parte

o all'intero sottobacino. [Shouhong and Yiping \(2014\)](#) utilizzano il modulo LID della versione 5.1.006 per la modellazione di pavimentazioni permeabili mediante l'apposito LID (permeable pavement). Gli autori concludono che il software é generalmente in grado di fornire risultati ragionevoli quando si utilizzano time steps molto piccoli ma in alcune occasioni, nonostante vengano utilizzati time steps molto piccoli il software fornisce dei risultati poco ragionevoli. Gli autori raccomandano di selezionare accuratamente i time steps di calcolo e se possibile di verificare i risultati con dati sperimentali. [Burszta-Adamiak and Mrowiec \(2013\)](#) utilizzano la versione 5.0.022 del software SWMM per modellare i deflussi di 4 tetti verdi di piccole dimensioni considerando 13 eventi pluviometrici separatamente. Gli autori concludono che il software non é in grado di simulare correttamente l'idrogramma di piena in uscita dal tetto verde, tuttavia risulta importante sottolineare come essi utilizzino il contenuto iniziale di umidità nel suolo come parametro di calibrazione e trascurino l'inclusione dell'evapotraspirazione nel modello.

Durante gli anni il software SWMM é stato continuamente aggiornato e molti bugs sono stati risolti. Nel presente elaborato la versione 5.1.07, rilasciata il 15 Settembre 2014, verrà utilizzata per modellare la risposta idrologica dei tetti verdi. Come consigliato da diversi autori ([Alfredo et al., 2010](#); [Burszta-Adamiak and Mrowiec, 2013](#); [Shouhong and Yiping, 2014](#)) l'attività di modellazione verrà comparata con i dati sperimentali derivanti dal monitoraggio del caso studio.

Il reference roof é costituito da una superficie impermeabile che drena in corrispondenza del pluviale contraddistinto in Fig. 5.9 con l'acronimo W15. In analogia con quanto effettuato da [Palla et al. \(2012\)](#) il reference roof é stato modellato scomponendo il dominio di calcolo in un sottobacino, rami e nodi. Le perdite idrologiche sono state calcolate secondo il metodo CN del Soil Conservation Service (SCS). I valori dei parametri utilizzati nella simulazione SWMM del RR sono elencati in tabella 5.5.

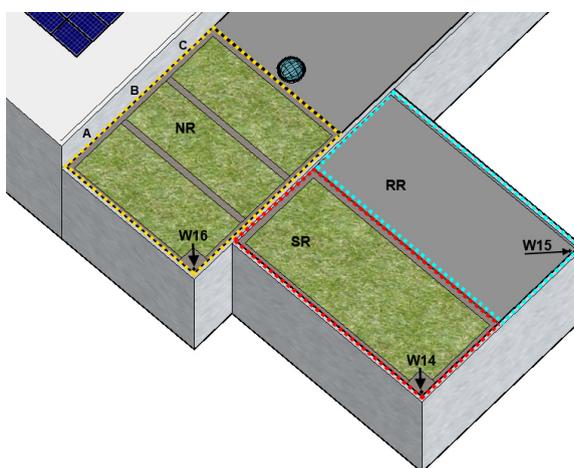


FIGURA 5.9: Area di pertinenza misuratori di portata. L'area evidenziata in giallo, corrispondente ai 3 subplots costituenti il Native Roof e viene monitorata dal sensore W16. I sensori W14 e W15 misurano il runoff rispettivamente del plot Sedum roof (area rossa) e del Reference Roof (area ciano).

Parametro	Unità	Valore
CN	-	100
Depression depth	mm	1
n Manning	-	0.011
% Zero-Imperv	%	5

TABELLA 5.5: Parametri utilizzati per la simulazione del Reference Roof

Il plot Sedum roof é stato modellato utilizzando rispettivamente il modulo LID “*Bio-retention Cells*” per simulare la copertura verde (pacchetto Harpo-Seic Mediterranean green roof) ed il modulo “*Permeable pavement*” per modellare il bordo in ghiaia che delimita la zona inverdita della copertura. I moduli LID presuppongono che il pacchetto verde venga scomposto in una serie di strati sovrapposti ognuno dei quali corrisponde agli elementi principali: vegetazione, substrato, drenaggio etc. Il LID “*Bio-retention Cells*”, partendo dall’alto verso il basso, é costituito: dal “*Surface layer*” che rappresenta la vegetazione, dal “*Soil layer*” che rappresenta il substrato ed infine dallo “*Storage layer*” con il quale si modellano lo strato drenate, il filtro e l’eventuale feltro di protezione. Il LID “*Permeable pavement*” prevede gli stessi parametri utilizzati nella “*Bio-retention Cells*” ad esclusione dello “*Storage layer*”. I valori dei parametri utilizzati nella simulazione LID-SWMM sono elencati in tabella 5.6. I parametri fisici del suolo che costituisce il “*Soil layer*” sono stati posti pari ai corrispettivi valori misurati in laboratorio. Ogni LID é stato collegato con un sottobacino (completamente occupato dal LID), con un nodo, con un condotto e con un outfall. Le simulazioni sono state condotte in continuo dal 1 Gennaio 2014 al 31 Dicembre 2014 utilizzando come parametri di input i dati di precipitazione (5 minuti di time-step) registrati dalla stazione meteo. Per quanto concerne l’evapotraspirazione che, come evidenziato da [Burszta-Adamiak and Mrowiec \(2013\)](#) rappresenta il parametro chiave nelle simulazioni in continuo, il software non consente l’inserimento di valori medi giornalieri di ETa (ricavati attraverso l’equazione 5.10) ma consente di inserire un pattern di parametri (un parametro per ogni mese) che possono essere moltiplicati alla ETp. A seguito dunque delle considerazioni effettuate nel capitolo precedente si é scelto di esprimere l’ETp mediante la formulazione di Hargreaves (5.5) trasformandola in ETa mediante l’applicazione dei corrispettivi coefficienti colturali mensili indicati in tabella 5.4. Questa semplificazione causa la perdita delle informazioni relative all’umidità del suolo ed in particolare porta a trascurare il fatto che, a parità di condizioni meteorologiche, in ridotte condizioni di umidità l’evapotraspirazione media giornaliera tende a diminuire.

Layer	Parametri	Unità	Bio-retention Cells	Permeable pavement
Surface	Berm Height	<i>mm</i>	3	3
	Vegetation Volume Fraction		0.15	0
	Surface Roughness		0.2	0.02
	Surface Slope	%	0.75	0.75
Pavement	Thickness	<i>mm</i>	-	100
	Void Ratio		-	0.4
	Impervious Surface Fraction		-	0
	Permeability	<i>mm/h</i>	-	3000
	Clogging Factor		-	0
Soil	Thickness	<i>mm</i>	100	-
	Porosity	%	0.65	-
	Field Capacity	m^3/m^3	0.35	-
	Wilting Point	m^3/m^3	0.06	-
	Conductivity	<i>mm/h</i>	2280	-
	Conductivity Slope		5	-
	Suction Head	<i>mm</i>	25	-
Storage	Thickness	<i>mm</i>	25	25
	Void Ratio		0.5	0.5
	Infiltration Rate		0	0
	Clogging Factor		0	0
Underdrain	Drain Coefficient		2	0.15
	Drain Exponent		2.1	1.6
	Offset Height	<i>mm</i>	3	3

TABELLA 5.6: Parametri della “Bio-retention Cells” e della “Permeable pavement” utilizzati nella LID-SWMM per simulare il plot SR.

5.4.2 Risultati e discussione

5.4.2.1 Calibrazione e Validazione

Le simulazioni, condotte in continuo, sono state fatte iniziare il 01/01/2014 e terminare il 31/12/2014. Questa scelta ha consentito sia lo sfruttamento dell'intero dataset derivante dalla campagna sperimentale che l'eliminazione delle imprecisioni legate alla definizione del contenuto di umidità iniziale del suolo. [Burszta-Adamiak and Mrowiec \(2013\)](#) infatti, nella loro attività di modellazione dei tetti verdi mediante il modulo LID del software SWMM, evidenziano come il grado di saturazione iniziale del suolo è il parametro che maggiormente influenza i risultati delle simulazioni quando queste vengono effettuate considerando i singoli eventi separatamente. Nel presente studio, per quando concerne i LID utilizzati nella modellazione del tetto verde, si è ipotizzato di partire da una condizione di suolo saturo (saturazione 100%) e si è lasciato che fosse il software stesso, in funzione dei parametri meoclimatici inseriti, a determinare il grado di saturazione del suolo prima di ogni precipitazione. La strategia di calibrazione e validazione è stata basata sulla comparazione degli idrogrammi osservati e simulati in uscita dai plot considerati sulla base dei singoli eventi (per la definizione di evento si rimanda al Capitolo 3). Gli indici utilizzati per la valutazione delle prestazioni del modello durante le due fasi sono essenzialmente volti alla comparazione dei volumi defluiti e dei

picchi dell'idrogramma di piena. In analogia con quanto effettuato da [Palla et al. \(2012\)](#) la precisione raggiunta nel modellare i volumi defluiti ed i picchi di piena é stata valutata semplicemente mediante la stima dell'errore percentuale relativo (RPD). L'indice RPD viene calcolato attraverso la seguente equazione $RPD = 100 * (x_{oss} - x_{sim}) / x_{oss}$ in cui x_{sim} rappresenta il valore simulato e x_{oss} il valore osservato.

Il modello del Reference roof, é stato calibrato sulla base di 2 eventi reali (19/02/2014 e 04/03/2014) misurati durante il monitoraggio e validato sulla base dell'evento del 03/04/2014. L'utilizzo di un numero così limitato di eventi scaturisce dal fatto che il misuratore di livello (W15) é stato soggetto a frequenti e prolungati malfunzionamenti a causa dei quali gli eventi affidabili misurati sono un numero molto ridotto. La Fig. 5.10 e la Fig. 5.11 mostrano gli eventi utilizzati in fase di calibrazione e di validazione in termini di ietogramma di precipitazione e portata defluita misurata. Ai presenti dati é stato sovrapposto il risultato della simulazione ottenuta mediante il modello SWMM del plot RR. Gli eventi utilizzati sono caratterizzati da intensità di precipitazione medio-basse e durate variabili. Il modello, in fase di calibrazione, riesce a riprodurre con elevata precisione sia la forma dell'idrogramma che i picchi e i volumi come dimostrato dall'elevato valore del parametro NSE (0.7-0.87) ed il ridotto scarto percentuale tra i volumi e i colmi di portata misurati e simulati (tabella 5.8). Nell'unico evento utilizzato per la validazione, caratterizzato da una durata di circa 19 ore e da un intensità di precipitazione massima di 9.6 mm/h , viene riprodotta con buona approssimazione sia la forma dell'idrogramma che i ripetuti picchi di portata. La stima dell'errore percentuale relativo ai volumi evidenzia tuttavia un'elevata sovrastima dei volumi. La calibrazione del modello del plot Sedum Roof é stata effettuata sulla base di 4 eventi selezionati avendo cura di includere eventi con caratteristiche differenti (volumi defluiti, intensità al picco, stagione, intensità di precipitazione).

I parametri che maggiormente influenzano le simulazioni sono i parametri dell'“Underdrain” che costituisce un elemento opzionale dello “Storage layer” attraverso il quale é possibile regolare la portata in uscita dai LID. L'“Underdrain” fornisce come output una portata (q) per unità di superficie (mm/h) che viene espressa mediante la seguente equazione:

$$q = C(h - Hd)^n \quad (5.11)$$

in cui h rappresenta lo spessore dello strato drenante, Hd é l'altezza (offset) rispetto al fondo della lama d'acqua, e C e n sono due coefficienti che regolano la portata in uscita dallo strato drenante in funzione dell'altezza della lama d'acqua. Questi ultimi due parametri rappresentano i parametri sui quali si é maggiormente intervenuto in fase di calibrazione.

La Fig. 5.12 e la Fig. 5.13 mostrano gli eventi utilizzati in fase di calibrazione e di validazione in termini di ietogramma di precipitazione e portata defluita misurata. Ai

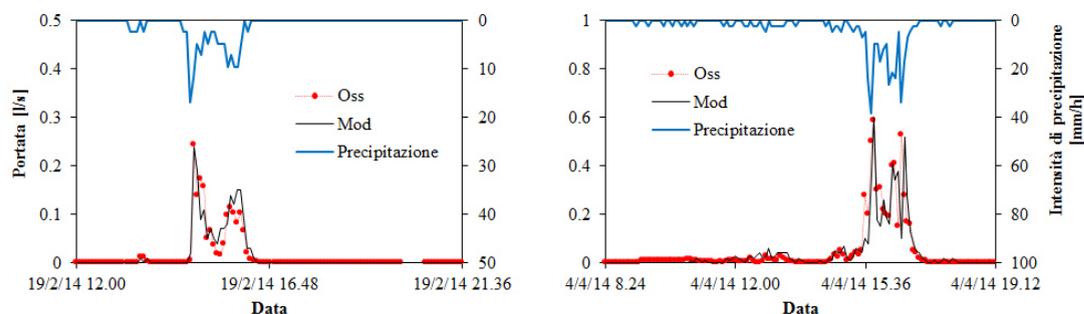


FIGURA 5.10: letogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati (linea nera) ed i deflussi misurati (linea rossa) degli eventi utilizzati in fase di calibrazione per il modello del Reference Roof.

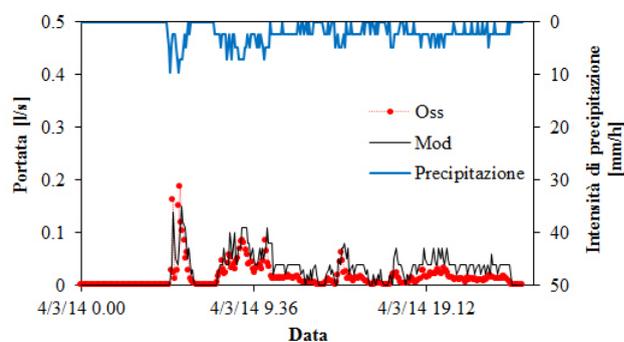


FIGURA 5.11: letogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati (linea nera) ed i deflussi misurati (linea rossa) degli eventi utilizzati in fase di validazione per il modello del Reference Roof.

Plot	Evento	NSE	RSR
Reference roof	19 febbraio 2014 ^C	0.87	0.36
	03 marzo 2014	0.41	0.77
	04 aprile 2014 ^C	0.7	0.36
Sedum Roof	10 febbraio 2014 ^C	0.58	0.65
	22 febbraio 2014	0.6	0.63
	14 giugno 2014 ^C	0.66	0.59
	26 giugno 2014	-0.54	1.24
	11 settembre 2014	0.85	0.39
	20 settembre 2014 ^C	0.93	0.27
	13 ottobre 2014	-0.94	1.39
	17-18 novembre 2014 ^C	0.61	0.62
	10-11 novembre 2014	0.44	0.75
3 dicembre 2014	0.76	0.49	

TABELLA 5.7: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) e Observation Standard deviation Ratio (RSR) per gli eventi utilizzati in fase di calibrazione validazione. L'apice ^C contrassegna gli eventi utilizzati in fase di calibrazione.

		RPD	
		Volume (%)	Picco (%)
Reference roof	19 febbraio 2014 ^C	1.92	-2.04
	03 marzo 2014	-93	19.35
	04 aprile 2014 ^C	-24	1.63
Sedum Roof	10 febbraio 2014 ^C	164.9	-27.5
	22 febbraio 2014	120.2	-29.4
	14 giugno 2014 ^C	-46.0	14.0
	26 giugno 2014	-52.0	23.3
	11 settembre 2014	-27.3	8.1
	20 settembre 2014 ^C	-6.0	-17.7
	13 ottobre 2014	-48.1	62.2
	17-18 novembre 2014 ^C	-62.8	-30.7
	10-11 novembre 2014	103.7	-150.0
	3 dicembre 2014	52.2	-13.6

TABELLA 5.8: Differenza percentuale relativa (RPDs) tra il volume defluito e il picco di portata tra gli eventi monitorati e simulati durante la fase di calibrazione e validazione. L'apice ^C contrassegna gli eventi utilizzati in fase di calibrazione.

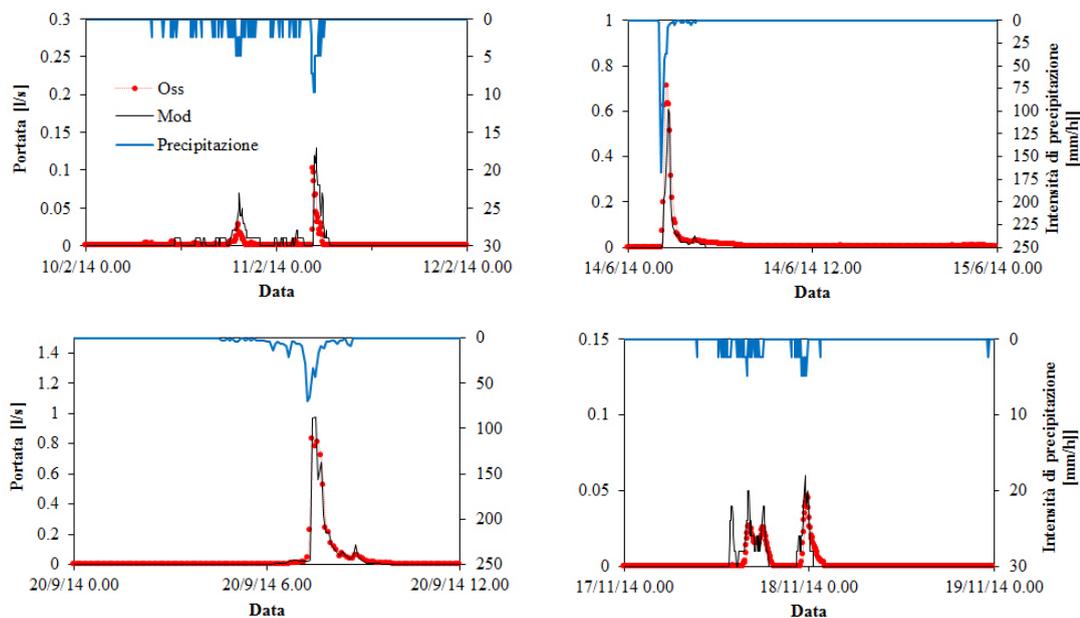


FIGURA 5.12: letogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati (linea nera) ed i deflussi misurati (linea rossa) degli eventi utilizzati in fase di calibrazione per il modello del Sedum Roof.

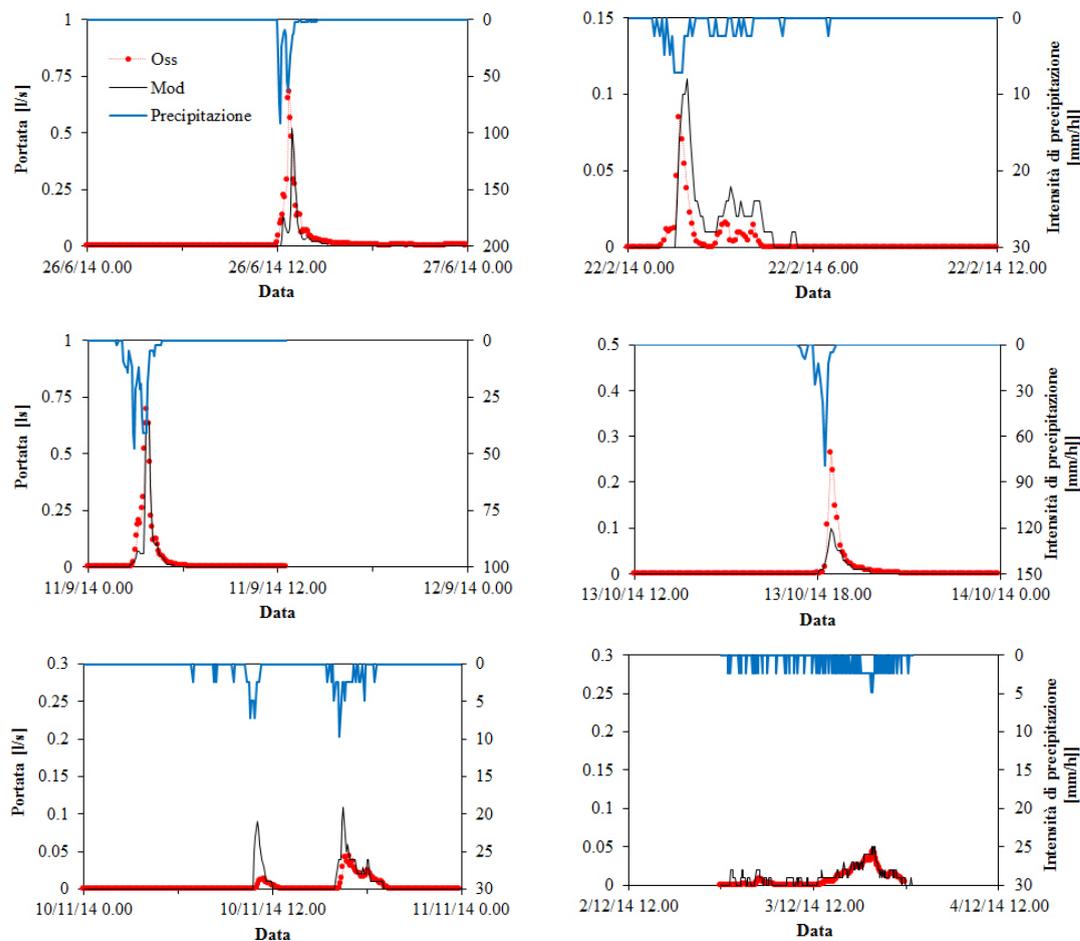


FIGURA 5.13: Ietogramma di precipitazione e comparazione tra i deflussi simulati (linea nera) ed i deflussi misurati (linea rossa) degli eventi utilizzati in fase di validazione per il modello del Sedum Roof.

presenti dati è stato sovrapposto il risultato della simulazione ottenuta mediante il modello LID-SWMM del plot SR. La tabella 5.7 fornisce la stima del parametro NSH e del parametro RSR per gli eventi utilizzati sia in fase di calibrazione che di validazione. I risultati della fase di calibrazione, illustrati in Fig. 5.12, nella tabella 5.7 e nella tabella 5.8 rivelano che il modello è in grado di descrivere la risposta idrologica del tetto verde. In fase di calibrazione il valore di NSE è sempre maggiore di 0.5 mentre il valore del parametro RSR è sempre inferiore all'unità ciò significa che il modello è caratterizzato da un livello prestazionale accettabile. La rappresentazione grafica degli eventi utilizzati in fase di calibrazione (Fig. 5.12) dimostra che il modello è in grado di simulare con buona approssimazione la forma degli ietogrammi anche quando questi sono costituiti da forme complesse (picchi multipli). In occasione degli eventi registrati il 14/06/2014 e il 20/09/2014 caratterizzati da intensità di precipitazione medio alte il modello è in grado sia di rappresentare con buona approssimazione il picco di piena ($RPD \leq 15\%$)

che la forma dell'idrogramma di piena è caratterizzata da una lunga fase finale. Il valore del parametro RPD per i volumi mostra invece che essi vengono stimati con buona approssimazione il 20/09/2014 mentre vengono sottostimati il 14/06/2014. Si ritiene comunque importante sottolineare come l'evento registrato in data 20/09/2014 sia caratterizzato da un'intensità di precipitazione massima pari a 168 mm/h per la quale è possibile che lo strumento posto nel pluviometro possa essere meno preciso. Per gli eventi caratterizzati da basse portate il modello ha dimostrato di essere in grado di riprodurre la forma ed il picco degli idrogrammi ma mostra sensibili errori nella stima dei volumi. Le prestazioni del modello in fase previsionale sono state valutate sia mediante la rappresentazione grafica degli idrogrammi simulati e misurati (Fig. 5.13) che attraverso la determinazione dei parametri NSH, RSR (tabella 5.7) e RPD sui picchi e sui volumi. La Fig. 5.13 mostra come anche in fase di validazione il modello è in grado di simulare con buona approssimazione la forma dell'idrogramma defluito anche quando questo presenta picchi multipli come nel caso dell'evento del 22/02/2014. Il valore di NSE è sempre compreso tra 0 e 1 ad eccezione dell'evento registrato in data 13/10/2014 per il quale assume un valore negativo. In fase di validazione si assiste ad un incremento dell'errore nella stima sia dei volumi defluiti che dei picchi. I volumi defluiti ed i picchi di deflusso vengono alternativamente sottostimati (26/06/201, 13/10/2014) o sovrastimati (22/02/2014, 10/11/2014). Questo fenomeno ci suggerisce che probabilmente l'approssimazione effettuata nella stima dell'evapotraspirazione possa determinare uno stato iniziale del suolo nel modello non corrispondente a quello reale.

5.4.2.2 Risultati

Il modello del Reference Roof e quello del Sedum Roof una volta calibrati e validati sono stati utilizzati per effettuare una simulazione in continuo di 12 mesi i cui parametri in input sono stati la precipitazione, le temperature dell'aria ed i coefficienti colturali mensili.

La simulazione in continuo consente la stima, su base annuale, delle differenze tra i volumi di acqua piovana che giungono in fognatura in situazioni standard "reference roof" e a seguito dell'installazione del tetto verde "sedum roof". Negli ultimi anni questo tipo di informazioni ha assunto notevole importanza, infatti, le diffuse e pesanti limitazioni alla capacità di deflusso delle reti fognarie esistenti e degli alvei naturali hanno imposto la ricerca di scenari pianificatori atti ad una drastica riduzione delle portate di piena convogliate verso valle da contrapporre al tradizionale adeguamento della capacità di convogliamento degli alvei (Becciu and Paoletti, 2010; Casadio et al., 2013). La nuova ingegneria idraulica urbana risponde alla crescente urbanizzazione con il criterio dell'*invarianza idrologica/idraulica* che consiste nella garanzia di invarianza dei

volumi affluenti in fognatura e dei tempi di concentrazione delle piene pre e post urbanizzazione. In numerosi paesi, come anche in Italia, un numero crescente di Enti ha emanato specifiche direttive e normative finalizzate al rispetto dell'invarianza idrologica. In alcuni paesi vengono inoltre elargiti dei contributi per coloro che decidono di installare tecnologie atte alla riduzione dei deflussi quali ad esempio i tetti verdi (Berardi et al., 2014). Pianificatori, progettisti ed enti di controllo necessitano dunque di modelli semplici e "user friendly" che consentano la verifica dell'efficienza dei sistemi di mitigazione considerati. Alla luce di questo quadro generale risulta evidente come la possibilità di possedere uno strumento modellistico affidabile possa essere utile sia alle Amministrazioni per valutare l'efficacia degli interventi che ai progettisti per individuare la combinazione migliore di interventi da effettuare.

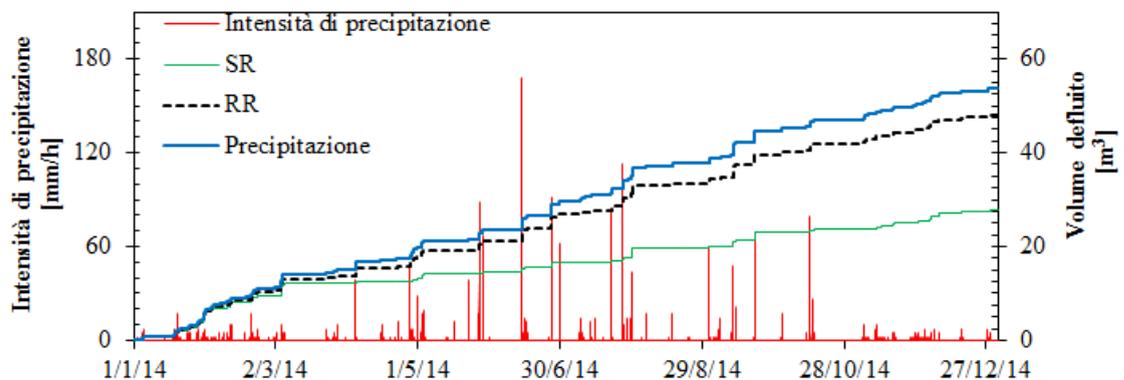


FIGURA 5.14: Ietogramma di precipitazione reale e comparazione tra i volumi simulati defluiti dal modello del RR (linea nera) ed i volumi simulati defluiti dal modello del SR (linea verde).

I risultati dei due modelli implementati vengono riportati in Fig. 5.14 che evidenzia le differenze tra i volumi cumulati annuali di precipitazione (linea azzurra), defluiti dal RR (linea nera) e dal tetto verde (linea verde). Le precipitazioni complessive nel 2014 sono state pari a 944 mm , se si moltiplica questo dato per l'area di ciascun settore si ottiene che entrambi i tetti sono stati soggetti ad un volume complessivo di precipitazione pari a circa 53.8 m^3 . Il RR, come ci si aspettava, al netto delle perdite idrologiche iniziali mostra un volume defluito cumulato circa pari a quello in ingresso. Durante il periodo invernale, a causa dei bassi valori di evapotraspirazione, l'efficienza del tetto verde risulta praticamente nulla. All'avanzare della stagione estiva, con l'aumentare della evapotraspirazione giornaliera, il tetto verde si dimostra un ottimo dispositivo di laminazione delle portate meteoriche. Se ci si sposta ad osservare i fenomeni dalla scala stagionale a quella annuale è evidente come il beneficio derivante dall'utilizzo di tetti verdi sia più palese. Il modello fornisce un volume cumulato defluito dal SR plot pari a 27.73 m^3 . Tale valore, che corrisponde circa ad una capacità di ritenzione del 48 % si

dimostra essere attendibile. Sfortunatamente non é possibile comparare le cumulate in output dal modello con i dati misurati a causa del malfunzionamento degli strumenti durante alcuni eventi meteorici. Il modello quindi si dimostra un buon predittore dei volumi defluiti. D'altro canto l'evapotraspirazione rappresenta il processo chiave del bilancio idrologico in quanto costituisce l'unico processo che consente la riduzione dell'umidità contenuta nel substrato.

5.4.3 Conclusioni

La modellazione in continuo dei processi idrologici attraverso il codice di calcolo EPA SWMM ha consentito la simulazione di un tetto impermeabile di riferimento (RR) e di un tetto verde (SR). Attraverso l'utilizzo del modulo LID (Low impact development) é stato possibile implementare una configurazione di sottobacino caratterizzata dalla stratigrafia tipica di un tetto verde (vegetazione, suolo e strato drenate). Il modello del tetto di riferimento (RR), calibrato e validato sulla base di eventi reali ha consentito, come ci si aspettava, di modellare con risultati soddisfacenti i deflussi generati dal dilavamento di questa superficie durante gli eventi meteorici. Il presente modello potrà dunque essere utilizzato per comparare le prestazioni di un tetto tradizionale e di un tetto verde. Il modello inoltre consente di sopperire all'assenza di dati di monitoraggio causati dai frequenti malfunzionamenti del misuratore di portata W15. La modellazione del Plot SR é stata effettuata scomponendo la superficie complessiva in due sottobacini sui quali sono stati collocati altrettanti moduli LID. Lo strato di ghiaia é stato modellato mediante l'ausilio del LID "Permeable Pavement" mentre il pacchetto verde si é utilizzato il modulo LID "Bio-retention Cells". I parametri caratteristici di suolo e della ghiaia sono stati posti pari ai corrispondenti valori misurati in laboratorio. Per entrambi i moduli LID si é impostata come condizione iniziale un grado di saturazione pari al 100%. Questa condizione determina, durante i primi giorni di simulazione, un graduale essiccamento del suolo determinato dall'azione dell'evapotraspirazione. Il modello calibrato e validato dimostra di essere in grado di riprodurre con buona approssimazione la forma ed il picco degli idrogrammi di piena. La sovrastima/sottostima in fase di validazione dei volumi defluiti é probabilmente imputabile sia ai possibili errori ai quali sono soggetti i dati misurati che ad un errore legato alle dinamiche con le quali viene modellato il progressivo essiccamento del suolo. L'errore sui volumi sembra compensarsi su scala annuale in cui il modello prevede con buona approssimazione la risposta idrologica dei due tetti. La simulazione in continuo ha inoltre consentito di dimostrare l'efficacia in termine di riduzione dei volumi defluiti del tetto verde rispetto al tetto tradizionale. Tale effetto é tanto maggiore quanto maggiore é l'evapotraspirazione. La simulazione continua nel tempo di tali processi consente di limitare l'influenza delle condizioni al

contorno rappresentate dal contenuto iniziale di umidità nel suolo parametro che invece veniva utilizzato in fase di calibrazione da [Burszta-Adamiak and Mrowiec \(2013\)](#). In fase di calibrazione si è riscontrato come probabilmente il software necessita di un miglioramento nell'algoritmo con il quale viene modellato il processo di infiltrazione nel suolo e nel drenaggio. Variazioni in positivo e in negativo di un ordine di grandezza dello spessore dei vari strati non determinano infatti variazioni nei valori delle portate defluite. Gli unici parametri sensibili risultano essere il coefficiente e l'esponente dell'equazione che determina la portata in uscita dal layer "Underdrain". Questo deficit dei moduli LID, già riscontrato nella modellazione delle pavimentazioni permeabili da [Shouhong and Yiping \(2014\)](#), preclude la possibilità di omettere la fase di calibrazione. Il modello correttamente calibrato sulla base dei dati sperimentali ha consentito la simulazione continua nel tempo dei processi idrologici mediante l'utilizzo in input dei parametri meteo-climatici (temperatura e pioggia) e dei coefficienti colturali del sedum. In conclusione il modello, se correttamente calibrato, è in grado di riprodurre in modo soddisfacente il comportamento idrologico tuttavia si ritiene che siano necessari futuri aggiornamenti del software volti al miglioramento della modellazione del processo di infiltrazione.

Capitolo 6

Conclusioni

Nel presente elaborato di tesi, si sono valutate le capacità di un tetto verde nel contribuire alla creazione di un ambiente urbano sostenibile. La ricerca è stata motivata dalla considerazione che poichè un numero sempre maggiore di stati e regioni raccomandano l'utilizzo dei tetti verdi per i benefici economici derivanti dalla riduzione dei consumi energetici, per i benefici ambientali derivanti dalla mitigazione dell'effetto isola di calore, dalla riduzione dei deflussi, per i benefici ecologici, naturalistici e sociali, fosse necessario perfezionare la comprensione delle strategie da adottare per massimizzare i risultati in particolare in campo idrologico e termico.

L'attività di ricerca di tesi è parte integrante del progetto “**Tetti verdi**” all'Università di Bologna proposto dalla Scuola di Ingegneria e Architettura, dal CIRI U.O. Fluidodinamica (Centri interdipartimentali di ricerca industriale) e dall'AUTC (Servizio tecnico di ateneo) con la partecipazione della Scuola di Agraria, dell'Azienda Agraria di Ateneo (AUB), delle aziende Harpo-Seic e Casalini C, e del gruppo “*Green roof*” della Columbia University. Il progetto rappresenta un mattoncino di un processo più grande che mira alla trasformazione dell'Ateneo di Bologna ed in particolare della sede di via del Lazzaretto della Scuola di Ingegneria in un “living lab” della sostenibilità (Bonoli and Cappellaro, 2013; Cappellaro and Bonoli, 2014).

Il progetto “**Tetti verdi**” ha consentito la realizzazione di un laboratorio a cielo aperto in cui è stato installato un tetto verde piano di tipo estensivo di circa 200 m² per il quale è stato predisposto un completo piano di monitoraggio dei parametri meteo-climatici, idrologici e termici. Il progetto pilota dell'Ateneo di Bologna rappresenta uno dei pochi tetti verdi strumentati in scala reale in cui è possibile confrontare il comportamento di specie vegetali differenti, presenti in area mediterranea.

L'attività di ricerca, che costruisce le sue basi in 15 mesi di osservazioni sperimentali, si inserisce in questo contesto generale con l'obiettivo di perfezionare la comprensione dei meccanismi che influenzano il comportamento idrologico e termico di un tetto verde

e colmare alcune delle lacune riscontrate in letteratura nel campo della modellazione dei fenomeni evapotraspirativi e delle simulazioni idrologiche in continuo dei tetti verdi. Nella prima parte dell'elaborato viene proposta l'analisi dettagliata della ritenzione misurata nei due tetti verdi, dalla quale emerge che: a parità di condizioni meteorologiche, la tipologia di vegetazione influenza i deflussi. In particolare le specie di tipo erbaceo sono più efficienti nel ridurre i deflussi rispetto alle specie di tipo Sedum. I minori tassi di evapotraspirazione del Sedum, caratteristici delle specie di tipo CAM, non solo riducono l'abilità di un tetto verde di mitigare i deflussi ma spesso riducono i processi evaporativi del suolo. Al contrario le specie C3, quali sono quelle installate nella parcella sperimentale NR, generalmente traspirano utilizzando una maggiore quantità di acqua per molecola di CO_2 fissata e quindi, avendo un più alto tasso di evapotraspirazione, riescono a ridurre più rapidamente il contenuto di umidità del substrato. Le differenze metaboliche tra le specie analizzate non solo determinano differenze in termini di prestazioni idrologiche, ma anche in termini di capacità di mitigazione dell'effetto isola di calore. Il Sedum, in condizioni di stress idrico o elevate temperature diurne attiva il metabolismo di tipo CAM grazie al quale riesce a salvaguardare l'acqua al suo interno attraverso la chiusura diurna degli stomi. Questo comportamento determina un innalzamento delle temperature della massa vegetale a livelli spesso superiori di quelli raggiunti dall'aria. Il plot ricoperto da vegetazione di tipo C3 (NR) si dimostra invece in grado di raggiungere temperature inferiori a causa dell'apertura diurna degli stomi conseguente alla necessità di effettuare contemporaneamente traspirazione e fotosintesi. Risulta inoltre importante sottolineare come entrambi i tetti riescano comunque a garantire temperature giornaliere massime anche di 40 °C inferiori a quelle raggiunte dalla membrana bituminosa nera durante il periodo estivo. Le minori escursioni termiche a cui è soggetta la membrana al di sotto dei due tetti verdi, sia in inverno che in estate, ne determinano sia un allungamento della vita utile che un miglioramento delle condizioni termo-igrometriche all'interno dell'edificio. L'analisi delle temperature della colonna d'aria sopra il tetto a Sedum e sopra il tetto di riferimento dimostrano come il tetto verde è in grado di garantire sino ai 30 cm una minore temperatura dell'aria (circa 1.5 °C a Ottobre). In conclusione l'analisi dei dati sperimentali ha mostrato che l'utilizzo di specie native caratterizzate da metabolismo di tipo C3, a causa del più alto tasso di evapotraspirazione giornaliera si dimostra più efficiente sia nel ridurre i deflussi che nel ridurre le temperature superficiali dei tetti. Questi benefici tendono ad essere massimi durante la stagione estiva e a ridursi durante la stagione invernale a causa della progressiva senescenza della vegetazione che tende a minimizzare gli effetti positivi. Ai benefici derivanti dall'utilizzo di specie native si contrappone la necessità di un'irrigazione giornaliera durante il periodo estivo che tuttavia se da un lato viene scoraggiata a causa dell'aumento del costo dell'intervento e dell'allontanamento dall'obiettivo di creazione

di un tetto verde in grado di auto-sostenersi dall'altro è stato dimostrato che agevola l'evapotraspirazione e quindi migliora le prestazioni termiche ed idrologiche dei tetti verdi. La selezione delle specie vegetali deve essere quindi effettuata non solo con l'obiettivo di minimizzare le spese manutentive, ma anche cercando di considerare le prestazioni generali che si vogliono ottenere. Inoltre l'utilizzo di specie native consente di aumentare il valore ecologico dell'intervento. La seconda parte dell'elaborato si focalizza invece sulla modellazione numerica dei processi idrologici. In particolare vengono proposti e valutati alcuni modelli per la stima dell'evapotraspirazione reale e viene implementato un modello delle superficie vegetate mediante l'utilizzo del software SWMM con il quale sono state successivamente effettuate delle simulazioni in continuo (12 mesi).

La modellazione dei fenomeni evapotraspirativi dei tetti verdi è avvenuta partendo dalla considerazione che in tempo secco è possibile ridurre i parametri che influenzano il bilancio idrologico in quanto i contributi forniti da precipitazione e deflusso si annullano. Conseguentemente le variazioni di umidità del suolo sono attribuibili unicamente ai processi evapotraspirativi. L'attività di modellazione è stata preceduta da una fase iniziale di analisi dei dati di monitoraggio dai quali è emerso che il substrato è soggetto sia ad un trend costante di riduzione dell'umidità che a delle fluttuazioni cicliche giornaliere caratterizzate da ampiezza direttamente proporzionale al contenuto di acqua nel suolo e ai parametri meteo-climatici. Inoltre a parità di contenuto volumetrico iniziale di acqua nel substrato le fluttuazioni giornaliere risultano influenzate dallo stato vegetativo delle piante, raggiungendo i valori massimi nella fase riproduttiva primaverile ed estiva e diminuendo gradualmente sino a giungere ai valori minimi nella fase di senescenza invernale. Una volta individuati i meccanismi chiave del processo si sono proposti due modelli numerici che consentono la trasformazione dell'evapotraspirazione potenziale, calcolata mediante l'equazione di Hargreaves e di Penman-Monteith, in evapotraspirazione reale mediante l'applicazione: (1) di una funzione di estrazione dell'umidità dal suolo (SMEF) che consente di tener conto della condizione di umidità iniziale del substrato e (2) di un set di coefficienti colturali mensili, ricavati per calibrazione a partire dai dati sperimentali, che consentono di introdurre nel modello lo stato vegetativo della pianta al momento della simulazione. L'applicazione dei modelli porta a risultati soddisfacenti sia quando la ETp viene stimata con Hargreaves che quando si stima con Penman-Monteith.

Perseguendo l'obiettivo di individuare uno strumento modellistico che potesse essere utilizzato da progettisti e dagli Enti per valutare le prestazioni di diverse configurazioni di tetti verdi si è implementato mediante l'utilizzo del software EPA's SWMM (versione 5.1.007) il modello numerico di una superficie di riferimento (RR) e del tetto verde estensivo a Sedum (SR). Mediante l'utilizzo dei moduli LID (Low Impact Development)

è stato possibile implementare una configurazione di sottobacino drenate caratterizzata dalla stratigrafia tipica di un tetto verde. Entrambi i modelli sono stati calibrati e validati sulla base dei dati sperimentali e successivamente utilizzati per effettuare una modellazione in continuo (12 mesi) i cui parametri di input sono stati la precipitazione, le temperature dell'aria e i coefficienti culturali mensili precedentemente misurati. I risultati della simulazione in continuo mostrano l'efficacia in termini di riduzione dei volumi defluiti annuali dei tetti verdi rispetto al tetto tradizionale. Tale effetto è tanto maggiore quanto maggiore è l'evapotraspirazione. La simulazione in continuo ha inoltre consentito di ridurre gli errori derivanti dall'impostazione delle condizioni iniziali. Il modello si dimostra un valido strumento per la modellazione dei deflussi tuttavia, in fase di calibrazione, si è riscontrato come probabilmente il software necessita di un miglioramento nell'algoritmo con il quale viene modellato il processo di infiltrazione nel suolo e nel drenaggio. Variazioni in positivo di un ordine di grandezza dello spessore dei vari strati non determinano significative variazioni nei valori delle portate defluite. Gli unici parametri sensibili risultano essere il coefficiente e l'esponente con cui si determinano le portate in uscita dall'"Underdrain". Questo deficit dei moduli LID, già riscontrato da altri autori nella modellazione delle pavimentazioni permeabili, preclude la possibilità di omettere la fase di calibrazione.

Bibliografia

- Alfredo, K., Montalto, F., and Goldstein, A. (2010). Observed and Modeled Performances of Prototype Green Roof Test Plots Subjected to Simulated Low- and High-Intensity Precipitations in a Laboratory Experiment. *J. Hydrol. Eng.*, 15:444–457.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrig. Drain. Pap. No. 56, FAO*, (56):300.
- Andri, S. and Sauli, G. (2012). Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico. ISPRA, Manuale e Linee Guida 78.3/2012. Technical report.
- Becciu, G. and Paoletti, A. (2010). *Fondamenti di costruzioni idrauliche*. Utet Scienze Tecniche, Assago (MI).
- Beguiría, S. and Vicente-Serrano, S. M. (2013). SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index.
- Bengtsson, L., Grahn, L., and Olsson, J. (2005). Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nord. Hydrol.*, 36(3):259–268.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., and GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Appl. Energy*, 115:411–428.
- Berghage, R., Beattie, D., Jarrett, A., Thuring, C., Razaei, F., and O'Connor, T. (2009). Green Roofs for Stormwater Runoff Control. EPA/600/R-09/026. Technical report, EPA, United States Environmental Protection Agency.
- Berkompas, B., Marx, K., Wachter, H., Beyerlein, D., and Spencer, B. (2008). A study of green roof hydrologic performance in the cascadia region. In *2008 Int. Low Impact Dev. Conf.*, number LID, pages 1–10.
- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality : A review. *Ecol. Eng.*, 36(4):351–360.

- Berretta, C., Poë, S., and Stovin, V. (2014a). Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *J. Hydrol.*, 511:374–386.
- Berretta, C., Poë, S., and Stovin, V. (2014b). Reprint of “Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics”. *J. Hydrol.*, pages 1–13.
- Bittelli, M. and Flury, M. (2009). Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates. *Soil Phys.*, 73(5):1453–1456.
- Bittelli, M., Guerra, E., Solone, R., Guermandi, M., Laruccia, N., and Marletto, V. (2009). Confronto tra diverse misure di laboratorio della curva di ritenzione idrica dei suoli per il miglioramento della stima del bilancio idrico in Emilia Romagna. *Riv. It. AgroMet.*, 14(2):94–95.
- Blank, L., Vasl, A., Levy, S., Grant, G., Kadas, G., Dafni, A., and Blaustein, L. (2013). Directions in green roof research: A bibliometric study. *Build. Environ.*, 66:23–28.
- Blanusa, T., Vaz Monteiro, M. M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., and Cameron, R. W. F. (2013). Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better 'cooling service'? *Build. Environ.*, 59:99–106.
- Bliss, D. J., Neufeld, R. D., and Ries, R. J. (2009). Storm water runoff mitigation using green roof. *J. Ries. Environ. Eng. Sci.*, 26(2):407–418.
- Bonoli, A. and Cappellaro, F. (2013). Implementing sustainability process into University of Bologna. In *II Congr. Ital. Univ. Netw. Dev. Coop.*, pages 19–21.
- Bonoli, A., Conte, A., Maglionico, M., and Stojkov, I. (2013). Green Roofs For Sustainable Water Management. *Environ. Eng. Manag. J.*, 12(S11):153–156.
- Burszta-Adamiak, E. and Mrowiec, M. (2013). Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Sci. Technol.*, 68(1):36–42.
- Butler, C. and Orians, C. M. (2011). Sedum cools soil and can improve neighboring plant performance during water deficit on a green roof. *Ecol. Eng.*, 37(11):1796–1803.
- Campbell, G. and Campbell, C. (2005). Water Content and Potential, Measurement.
- Cappellaro, F. and Bonoli, A. (2014). University in Transition. How to transform campus into living laboratory of sustainability. In *5th Int. Conf. Sustain. Transitions*, pages 27–29.

- Carbone, M., Garofalo, G., Nigro, G., and Piro, P. (2014). A Conceptual Model for Predicting Hydraulic Behaviour of a Green Roof. *Procedia Eng.*, 70:266–274.
- Carson, T. B., Marasco, D. E., Culligan, P. J., and McGillis, W. R. (2013). Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. *Environ. Res. Lett.*, 8:024036.
- Carter, T. and Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 42:1261–1274.
- Casadio, A., Cipolla, S. S., Maglionico, M., and Martinini, P. (2013). Numerical modeling of the sewer system of Rimini (Italy) and strategies for the CSOs reduction on the Adriatic sea. *Environmental Eng. Manag. J.*, 12(9):0–3.
- Castleton, H., Stovin, V., Beck, S., and Davison, J. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit.pdf. *Energy Build. J.*, 42:1582–1591.
- Chemisana, D. and Lamnatou, C. (2014). Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. *Appl. Energy*, 119:246–256.
- Connelly, M. and Hodgson, M. (2008). Sound transmission loss of extensive green roofs: Field test results. *Can. Acoust.*, 36(3):74–75.
- Connelly, M., Liu, K., and Schaub, J. (2005). BCIT Green Roof Research Program, Phase 1 Summary of Data Analysis: Observation Period – Jan. 1, 2005 to Dec. 31, 2005. Technical report, Centre for the Advancement of Green Roof Technology.
- Consoli, S. (2012). La valutazione dei processi evapotraspirativi in piante di OPUNTIA FICUS INDICA. Technical report, Misura 124 PSR Sicilia 2007 - 2013.
- Cook-Patton, S. C. and Bauerle, T. L. (2012). Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: a literature review. *J. Environ. Manage.*, 106:85–92.
- Coutts, A. M., Daly, E., Beringer, J., and Tapper, N. J. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Build. Environ.*, 70:266–276.
- Dvorak, B. and Volder, A. (2010). Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. *Landsc. Urban Plan.*, 96(4):197–213.
- Eagleson, P. S. (1970). *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill.
- Emilsson, T. (2008). Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecol. Eng.*, 33(3-4):265–277.

- Fassman, E., Ph, D., Asce, A. M., and Simcock, R. (2013). Moisture Measurements as Performance Criteria for Extensive Living Roof Substrates. *J. Environ. Eng.*, 138(8):841–851.
- Feng, C., Meng, Q., and Zhang, Y. (2010). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy Build.*, 42(6):959–965.
- Feng, H. and Hewage, K. (2014). Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings. *Energy Build.*, 75:281–289.
- Fioretti, R., Palla, a., Lanza, L., and Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Build. Environ.*, 45(8):1890–1904.
- Galarza-Molina, S., Torres, A., Rengifo, P., and Puentes, A. (2014). The Hydrological Behaviour of an Eco-Productive Green Roof in. In *13th Int. Conf. Urban Drain.*, number September, pages 1–8, Sarawak, Malaysia.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., and Andresen, J. a. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecol. Eng.*, 31:225–231.
- GhaffarianHoseini, A., Dahlan, N. D., Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., Makaremi, N., and GhaffarianHoseini, M. (2013). Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 25:1–17.
- Gregoire, B. G. and Clausen, J. C. (2011). Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecol. Eng.*, 37(6):963–969.
- Gupta, V., Sorooshian, S., and Yapo, P. Y. (199). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *J. Hydrol. Eng.*, 4(2):133–143.
- Hakimdavar, R., Culligan, P. J., Finazzi, M., Barontini, S., and Ranzi, R. (2014). Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance. *Ecol. Eng.*, 73:494–508.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *Appl. Eng. Agric.*, 1(2):96–99.
- Hassid, S., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Linardi, A., Klitsikas, N., Georgakis, C., and Assimakopoulos, D. N. (2000). Effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy Build.*, 32:131–141.

- Hathaway, a. M., Hunt, W. F., and Jennings, G. D. (2008). a Field Study of Green Roof Hydrologic and Water Quality Performance. *Am. Soc. Agric. Bioeng.*, 51(1):37–44.
- Hien, N., Chen, Y., Leng, C., and Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Build. Environ.*, 38:261–270.
- Hilten, R. N., Lawrence, T. M., and Tollner, E. W. (2008). Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D. *J. Hydrol.*, 358:288–293.
- Hutchinson, D., Abrams, P., Retzlaff, R., and Liptan, T. (2003). Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, USA. Technical report.
- Jarrett, a., Hunt, W., and Berghage, R. (2006). Annual and individual storm green roof stormwater response models. In *ASABE Annu. Int. Meet.*, volume 062310, pages 1–11, Portland, Oregon.
- Jim, C. (2014a). Passive warming of indoor space induced by tropical green roof in winter. *Energy*, 68:272–282.
- Jim, C. Y. (2012). Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *Landsc. Ecol. Eng.*, 8:173–187.
- Jim, C. Y. (2014b). Heat-sink effect and indoor warming imposed by tropical extensive green roof. *Ecol. Eng.*, 62:1–12.
- Jones, H. G., Stoll, M., Santos, T., de Sousa, C., Chaves, M. M., and Grant, O. M. (2002). Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *J. Exp. Bot.*, 53(378):2249–2260.
- Kasmin, H., Stovin, V. R., and Hathway, E. A. (2010). Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs. *Water Sci. Technol.*, 62(4):898–905.
- Köhler, M. (2004). Energetic effects of green roof system on the urban climate near to the ground. In *Green Roof Congr.*, pages 72–79, Berlin.
- Kurtz Tim (2008). Flow monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. In Geoinstitute of ASCEE, editor, *2008 Int. Low Impact Dev. Conf.*, volume 11, pages 1–10.
- Lamera, C., Becciu, G., Rulli, M., and Rosso, R. (2014). Green Roofs Effects on the Urban Water Cycle Components. *Procedia Eng.*, 70:988–997.
- Liu, K. and Minor, J. (2005). Performance Evaluation of an Extensive Green Roof. *Green. Rooftops Sustain. Communities, Washington, D.C.*, pages 1–11.
- Locatelli, L., Mark, O., Steen, P., Arnbjerg-nielsen, K., Bergen, M., and John, P. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *J. Hydrol.*, 519:3237–3248.

- Lundholm, J. T. (2004). Green Roofs and Facades: A Habitat Template Approach. *Urban Habitats*, 4(1):87–101.
- Maglionico, M., Stojkov, I., Conte, A., Bonoli, A., and Cipolla, S. (2014). Green Roofs for Sustainable Water Management in Urban Areas. In *13th Int. Conf. Urban Drain.*, pages 1–10, Sarawak, Malaysia.
- Monterusso, M. a., Rowe, D. B., and Rugh, C. L. (2005). Establishment and persistence of *Sedum* spp. and native taxa for green roof applications. *Hort. Sci.*, 40(2):391–396.
- Moran, a., Hunt, W., and Smith, J. (2005). Green Roof Hydrologic and Water Quality Performance from Two Field Sites in North Carolina. *Manag. Watersheds Hum. Nat. Impacts*, pages 1–12.
- Morgan, S., Celik, S., and Retzlaff, W. (2013). Green Roof Storm-Water Runoff Quantity and Quality. *J. Environ. Eng.*, 139(2):471–478.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., R.D., H., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 50(3):885–900.
- Nagase, A. and Dunnett, N. (2010). Landscape and Urban Planning Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs : Effects of watering and diversity. *Landsc. Urban Plan.*, 97(4):318–327.
- Nagase, A. and Dunnett, N. (2012). Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landsc. Urban Plan.*, 104:356–363.
- Nagengast, A., Hendrickson, C., and Scott Matthews, H. (2013). Variations in photovoltaic performance due to climate and low-slope roof choice. *Energy Build.*, 64:493–502.
- Nardini, A., Andri, S., and Crasso, M. (2012). Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: Shrubs versus herbaceous plants. *Urban Ecosyst.*, 15:697–708.
- Nash, J. and Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10(3):282–290.
- Nobel, P. S. (1988). *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge. Cambridge University Press, New York.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., and Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *Bioscience*, 57:823–833.

- Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climates*. Cambridge University Press, New York, 2 edition.
- Palla, A., Gnecco, I., and Lanza, L. G. (2009). Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof. *J. Hydrol.*, 379(1-2):193–204.
- Palla, A., Gnecco, I., and Lanza, L. G. (2010a). Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. *Water*, 2:140–154.
- Palla, A., Gnecco, I., and Lanza, L. G. (2012). Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrol. Process.*, 26:73–84.
- Palla, A., Lanza, L. G., and La Barbera, P. (2008). A green roof experimental site in the Mediterranean climate. *11 th Int. Conf. Urban Drain.*, pages 31/8–5/9.
- Palla, A., Sansalone, J. J., Gnecco, I., and Lanza, L. G. (2010b). Storm water infiltration in a monitored green roof for hydrologic restoration L ' infiltration des eaux pluviales dans une toiture végétalisée instrumentée pour la restauration du cycle hydrologique naturel. In *Novatech 2010*, pages 1–10, Lione.
- Pammolli, A. and Marletto, V. (2005). Radiazione solare globale giornaliera: correzione dei dati archiviati e stima dei dati mancanti per la stazione agrometeorologica di San Pietro Capofiume (BO). *Riv. Ital. di Agrometeorologia*, 49(2):45–49.
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Mavrakis, a., and Santamouris, M. (2011). Evaluating thermal comfort conditions and health responses during an extremely hot summer in Athens. *Build. Environ.*, 46(2):339–344.
- Parizotto, S. and Lamberts, R. (2011). *Investigation of green roof thermal performance in temperate climate : A case study of an experimental building in Florianópolis city , Southern Brazil*, volume 43. Elsevier B.V.
- Penman, L. H. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In *Proc. Roy. Soc. London*, pages 120–146.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., and Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agric. Water Manag.*, 147:4–20.
- Pittaluga, I., Schenone, C., Palla, A., and Lanza, L. G. (2009). Le prestazioni acustiche del verde pensile : assorbimento sonoro di coperture di diversa configurazione. In *2a Giorn. Di Stud. Sull'Acustica Ambient.*, pages 1–19, Arenzano (Ge).
- Qin, H.-P., Li, Z.-X., and Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *J. Environ. Manage.*, 129:577–585.

- Ranalli, M. and Lundholm, J. (2008). Biodiversity and ecosystem function in constructed ecosystems. *CAB Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.*, 3:1–16.
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., and Kazemi, F. (2014). The growth and survival of plants in urban green roofs in a dry climate. *Sci. Total Environ.*, 476-477:288–297.
- Rossman, L. a. (2010). Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0.
- Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., and Sulaiman, M. (2013). A review of energy aspects of green roofs. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 23:155–168.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy*, 103:682–703.
- Sayed, O. H. (2001). Crassulacean Acid Metabolism 1975–2000, a Check List. *Photosynthetica*, 39(3):339–352.
- Scherba, A., Sailor, D. J., Rosenstiel, T. N., and Wamser, C. C. (2011). Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Build. Environ.*, 46:2542–2551.
- Schofield, R. K. (1935). The pF of water in the soil. In *Trans. 3rd Int. Congr. Soil Sci.*, pages 37–48, London.
- Schroll, E., Lambrinos, J., Righetti, T., and Sandrock, D. (2011). The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate. *Ecol. Eng.*, 37(4):595–600.
- She, N. and Pang, J. (2010). Physically Based Green Roof Model. *J. Hydrol. Eng.*, 15:458–464.
- Sherrard, J. a. and Jacobs, J. M. (2012). Vegetated Roof Water-Balance Model: Experimental and Model Results. *J. Hydrol. Eng.*, 17:858–868.
- Shouhong, Z. and Yiping, G. (2014). SWMM Simulation of the Storm Water Volume Control Performance of Permeable Pavement Systems. *J. Hydrol. Eng.*, 06014010(1):431–438.
- Spala, a., Bagiorgas, H. S., Assimakopoulos, M. N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., and Mihalakakou, G. (2008). On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renew. Energy*, 33:173–177.

- Speak, a. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., and Smith, C. L. (2013). Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Sci. Total Environ.*, 461-462:28–38.
- Spolek, G. (2008). Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosyst.*, 11:349–359.
- Stovin, V. (2010). The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water Environ. J.*, 24(3):192–199.
- Stovin, V., Poë, S., and Berretta, C. (2013). A modelling study of long term green roof retention performance. *J. Environ. Manage.*, 131:206–15.
- Stovin, V., Vesuviano, G., and Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *J. Hydrol.*, 414-415:148–161.
- Tarantino, A. and Pozzato, A. (2008). Strumenti per il monitoraggio della zona non satura. *Riv. Ital. di Geotec.*, 3:109–125.
- Teemusk, A. and Mander, U. (2007). Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecol. Eng.*, 30(3):271–277.
- Tuller, M. and Or, D. (2005). Water retention and characteristic curve.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.
- Van Renterghem, T. and Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Build. Environ.*, 44(5):1081–1087.
- Van Renterghem, T., Hornikx, M., Forssen, J., and Botteldooren, D. (2013). The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Build. Environ.*, 61:34–44.
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. a., Rugh, C. L., Fernandez, R. T., and Xiao, L. (2005). Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *J. Environ. Qual.*, 34(3):1036–44.
- Volder, A. and Dvorak, B. (2014). Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas. *Sustain. Cities Soc.*, 10:59–64.
- Voyde, E., Fassman, E., and Simcock, R. (2010a). Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *J. Hydrol.*, 394:384–395.

- Voyde, E., Fassman, E., Simcock, R., and Wells, J. (2010b). Quantifying Evapotranspiration Rates for New Zealand Green Roofs. *J. Hydrol. Eng.*, 15:395–403.
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., and Wörtche, H. (2014). Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: A literature review. *Build. Environ.*, 77:88–100.
- Whittinghill, L. J., Rowe, D. B., Andresen, J. a., and Cregg, B. M. (2014). Comparison of stormwater runoff from sedum, native prairie, and vegetable producing green roofs. *Urban Ecosyst.*, pages 13–29.
- Wong, G. K. L. and Jim, C. Y. (2014). Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime. *Ecol. Eng.*, 70:366–378.
- Xiao, M., Lin, Y., Han, J., and Zhang, G. (2014). A review of green roof research and development in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 40:633–648.
- Yang, J., Yu, Q., and Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos. Environ.*, 42:7266–7273.
- Yang, W.-y., Li, D., Sun, T., and Ni, G.-h. (2015). Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs. *Ecol. Eng.*, 74:327–336.
- Zhang, S. and Guo, Y. (2013). An Analytical Probabilistic Model for Evaluating the Hydrologic Performance of Green Roofs. *J. Hydrol. Eng.*, 18:19–28.
- Zhao, L., Xia, J., Xu, C. Y., Wang, Z., Sobkowiak, L., and Long, C. (2013). Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *J. Geogr. Sci.*, 23:359–369.
- Zhao, M., Tabares-Velasco, P. C., Srebric, J., Komarneni, S., and Berghage, R. (2014). Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer. *Build. Environ.*, 78:199–211.
- Zimmer, U. and Geige, W. (1997). Model for the design of multilayered infiltration systems. *Water Sci. Technol.*, 36:301 – 306.