

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANIELA BAUMANN

EFEITO TEMPORAL DE ESPÉCIES VEGETAIS NO POTENCIAL DE  
ESCOAMENTO SUPERFICIAL E NAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE  
SUBSTRATOS UTILIZADOS EM TELHADOS VERDES PARA REGIÃO DE  
CURITIBA-PR

CURITIBA  
2016

DANIELA BAUMANN

EFEITO TEMPORAL DE ESPÉCIES VEGETAIS NO POTENCIAL DE  
ESCOAMENTO SUPERFICIAL E NAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE  
SUBSTRATOS UTILIZADOS EM TELHADOS VERDES PARA REGIÃO DE  
CURITIBA-PR

Monografia apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Ambiental no curso de Engenharia Ambiental,  
Setor de Tecnologia da Universidade Federal do  
Paraná.

Orientador: D.Sc. Robson André Armino

Co-Orientadora: Dr. Francine Lorena Cuquel

CURITIBA  
2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

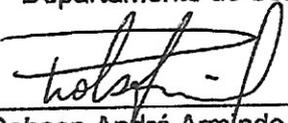
## TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

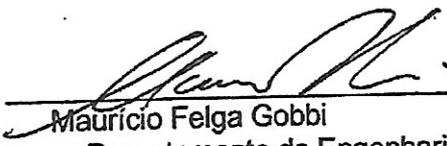
DANIELA BAUMANN

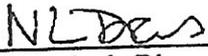
### EFEITO TEMPORAL DE ESPÉCIES VEGETAIS NO POTENCIAL DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E NAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE SUBSTRATOS UTILIZADOS EM TELHADOS VERDES PARA REGIÃO DE CURITIBA-PR

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 7,5, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):   
Robson André Armindo  
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola / UFPR

Membro(a) 1:   
Robson André Armindo  
Departamento de Solos e Engenharia Agrícola / UFPR

Membro(a) 2:   
Maurício Felga Gobbi  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 3:   
Nelson Luís Dias  
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Curitiba, 07 de julho de 2016

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por sua capacidade de acreditar e investir em mim, que mesmo longe, sempre estavam me motivando nos momentos difíceis.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

Ao meu namorado Rafael, por toda paciência, compreensão, carinho e amor, e por me ajudar muitas vezes a achar soluções quando elas pareciam não existir.

Ao meu orientador Robson Armindo, que mesmo longe, sempre tentou estar presente quando surgiam dúvidas, e por toda paciência nesta longa jornada.

À minha co-orientadora Francine Cuquel e à doutoranda Mariana Grassi pela minha inclusão neste projeto maravilhoso, por sempre estarem presentes quando necessário, e por toda ajuda e carinho recebidos durante o projeto.

Aos colegas do NAEB, Clayton, Alessandra, Briane e Marcieli, por toda ajuda e apoio, seja no laboratório, e mesmo em momentos difíceis que não pareciam acabar.

Agradeço também aos demais professores que me acompanharam durante a graduação. Eles foram essenciais para minha formação acadêmica.

À todos aqueles que, direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma e que estiveram e estão próximos de mim.

## RESUMO

Os telhados verdes possuem impactos ambientais benéficos significativos em zonas urbanizadas. O principal benefício para o qual são promovidos e adotados está relacionado com a eficiência energética que esse sistema pode proporcionar às edificações. O substrato do telhado verde é sem dúvida o elemento mais importante de um telhado verde, fornecendo água, nutrientes e suporte físico para as plantas. Apesar disso, pouca investigação ocorre atualmente sobre o efeito da composição do substrato em relação às suas propriedades e funções hidráulicas, bem como em relação ao crescimento e desempenho fisiológico da vegetação do telhado verde. Para maior eficiência do telhado verde, é necessário que o substrato possua adequada densidade, boa aeração e boa capacidade de retenção de água, entre outras características. Deste modo, o objetivo desse trabalho foi avaliar as propriedades e funções físico-hidráulicas de diferentes substratos utilizados em telhados verdes avaliando o potencial de escoamento superficial. Deste modo, para simulações do movimento de água nos substratos, foi utilizado a software Hydrus 1-D. A simulação foi realizada durante 1 ano e meio (novembro de 2014, quando os telhados verdes experimentais foram instalados; e abril de 2016). Os resultados mostram que os substratos apresentaram potencial de escoamento superficial quando a intensidade da precipitação foi maior que 8 mm/dia, e que também dependeu das condições anteriores do substrato, além da precipitação antecedente. Obteve-se baixos valores de escoamento superficial, em média de 0,00005 cm/dia, mostrando a grande capacidade dos substratos analisados em permear água. A função de pedotransferência Rosetta foi avaliada na estimativa das propriedades hidráulicas de substratos, em que concluiu-se que este programa não é adequado.

Palavras-Chave: meio poroso, retenção de água, permeabilidade hidráulica, escoamento superficial.

## ABSTRACT

Green roofs have significant beneficial environmental impacts in urban areas. . The main benefit for which they are promoted and adopted is related to the energy efficiency that this system can provide to buildings. The green roof substrate is arguably the most important element of a green roof system, providing water, nutrients and physical support for the plants. Nevertheless, there has been a lack of investigation on the effect of substrate composition relative to their hydraulic properties and functions, as well as in relation to the growth and physiological performance of the green roof vegetation. For better efficiency of the green roof system, it is necessary that the substrate has low density, good aeration and water holding capacity, among other characteristics. Thus, the aim of this study was to evaluate the physical-hydraulic properties and functions of different substrates used in green roofs evaluating the potential runoff. Thus, for the water movement simulations in the substrate, Hydrus 1-D software was used. The simulation was carried out for one year and a half (November 2014, when the experimental green roofs were installed, and April 2016). The results show that the analysed substrates showed potential for runoff when the precipitation intensity was higher than 8 mm/day, also depending on the previous conditions of the substrate, in addition to the foregoing precipitation. Low values of runoff were obtained, averaging 0,00005 cm/day, showing great ability of the analyzed substrates to permeate water. The pedotransfer Rosetta function was evaluated in the estimation of hydraulic properties of substrates, in which it was concluded that this program is not appropriate.

Keywords: porous media, water retention, hydraulic permeability, run-off.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - DETALHES DAS CAMADAS DE TELHADO VERDE EXTENSIVO .....	13
FIGURA 2 - DETALHE DAS CAMADAS DE TELHADO VERDE EXTENSIVO.....	14
FIGURA 3 - DETALHE DAS CAMADAS DE TELHADO VERDE INTENSIVO.....	16
FIGURA 4 - ESQUEMA DE UM VOLUME GENÉRICO DE MEIOS POROSOS COMO UM SISTEMA MULTICOMPONENTE.....	28
FIGURA 5 - ESQUEMA DO FUNIL DE HAINES.....	38
FIGURA 6 - IMAGEM OBTIDA EM MARÇO DE 2015 DOS TELHADOS VERDES EXPERIMENTAIS INSTALADOS NA FAZENDA CANGUIRI DO SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UFPR.....	50
FIGURA 7 - ETAPAS PARA PREPARO DE SUBSTRATO PARA DENSIDADE DE PARTÍCULAS E ANÁLISE TEXTURAL.....	53
FIGURA 8 - BALÕES VOLUMÉTRICOS DE 50 ML PREENCHIDOS POR SUBSTRATO E ÁLCOOL .....	54
FIGURA 9 - SUSPENSÃO AQUOSA DOS SUBSTRATOS EM PROVETAS DE 1000 ML PARA ANÁLISE TEXTURAL PELO MÉTODO DO DENSÍMETRO.....	56
FIGURA 10 - PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE DO LHI-NEAB UTILIZADO PARA A ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DO SUBSTRATO SATURADO.....	57
FIGURA 11 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA (FUNIL DE HAINES).....	58
GRÁFICO 1 - AVALIAÇÃO TEMPORAL DOS SUBSTRATOS DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016.....	70
GRÁFICO 2 - AVALIAÇÃO TEMPORAL DOS SUBSTRATOS DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 DE ACORDO COM A VEGETAÇÃO.....	72
GRÁFICO 3 - CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA DOS SUBSTRATOS ANALISADOS EM ABRIL DE 2016.....	73
GRÁFICO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S1 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	75
GRÁFICO 5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S2 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	76
GRÁFICO 6 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S3 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	76
GRÁFICO 7 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S4 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	77

GRÁFICO 8 - COMPARAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SUBSTRATO S1 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	78
GRÁFICO 9 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO S2 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	79
GRÁFICO 10 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO S3 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	80
GRÁFICO 11 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO S4 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA.....	80
GRÁFICO 12 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DE TODOS OS SUBSTRATOS.....	81
GRÁFICO 13 - DADOS METEOROLÓGICOS DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016. ....	82
GRÁFICO 14 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S1E1 .....	84
GRÁFICO 15 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S1E2 .....	86
GRÁFICO 16 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S2E1 .....	88
GRÁFICO 17 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S2E2 .....	90
GRÁFICO 18 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S3E1 .....	92
GRÁFICO 19 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S3E2 .....	94
GRÁFICO 20 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S4E1 .....	96
GRÁFICO 21 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S4E2 .....	98

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS POROS DO SOLO COM BASE NO DIÂMETRO .....	29
TABELA 2 - GRANULOMETRIA DOS SUBSTRATOS ANALISADOS REFERENTE À CLASSIFICAÇÃO DA FRAÇÃO MINERAL DO SOLO .....	63
TABELA 3 - UMIDADES INICIAIS DOS SUBSTRATOS AVALIADOS .....	65
TABELA 4 - DENSIDADES DOS SUBSTRATOS AVALIADOS.....	66
TABELA 5 - DENSIDADES SECA E ÚMIDA, E UMIDADE ATUAL EM NOVEMBRO DE 2014 E ABRIL DE 2016.....	67
TABELA 6 - UMIDADES VOLUMÉTRICAS NAS TENSÕES 0, 10, 50 E 100 HPA EM NOVEMBRO DE 2014 E ABRIL DE 2016.....	67
TABELA 7 - PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SUBSTRATOS.....	68
TABELA 8 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SUBSTRATO REFERENTES À NOVEMBRO DE 2014 .....	69
TABELA 9 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SUBSTRATO REFERENTES À ABRIL DE 2016 .....	69
TABELA 10 - PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SUBSTRATOS COM SUAS VEGETAÇÕES AVALIADAS EM ABRIL DE 2016 .....	71
TABELA 11 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA OBTIDOS COM OS PONTOS EXPERIMENTAIS.....	74
TABELA 12 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA SIMULADOS PELO ROSETTA.....	74
TABELA 13 - COEFICIENTE DAS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS SATURADAS OBERVADA E SIMULADA .....	78

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
2.1 TELHADOS VERDES .....	12
2.1.1 Definição .....	12
2.1.2 Tipos de Telhado Verde .....	13
2.1.3 Benefícios Ambientais do Telhado Verde .....	16
2.1.4 Histórico e exemplos .....	20
2.2 SUBSTRATOS.....	22
2.2.1 Tipos de Substratos para Telhados Verdes .....	24
2.2.2 Relações Área-massa-volume .....	28
2.2.3 Propriedades Físicas.....	34
2.2.4 Propriedades e Funções Hidráulicas de Meios Porosos .....	37
2.2.5 HYDRUS 1-D .....	42
2.3 VEGETAÇÃO.....	46
2.3.1 Vegetação para Telhados Verdes .....	47
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>50</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>63</b>
4.1 GRANULOMETRIA.....	63
4.2 UMIDADES .....	64
4.3 DENSIDADES.....	65
4.4 AVALIAÇÃO TEMPORAL DAS PROPRIEDADES FÍSICO-HIDRÁULICAS .....	66
4.5 HYDRUS 1-D .....	73
4.5.1 Rosetta .....	73
4.5.2 Simulação do escoamento superficial do telhado verde .....	81
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>100</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A forma mais comum de catástrofe natural, as inundações, tem aumentado significativamente em nível mundial nos últimos 20 anos. Nas áreas urbanas, a alta quantidade de estruturas permanentes e superfícies impermeáveis criam problemas ambientais particulares, como o pico de vazão e as inundações, aumentando o fluxo de água além do nível que pode ser gerenciado por sistemas de drenagem tradicional (GRACESON *et al.*, 2013).

Em relação aos sistemas de drenagem, o objetivo atual da política urbana sustentável é o controle eficaz de escoamento na fonte utilizando diversas estratégias pequenas e discretas que podem reduzir o risco de inundações a jusante. Os telhados verdes são apenas umas das possíveis estratégias que podem ser empregadas, aumentando a proporção de superfícies permeáveis capazes de reter e deter águas pluviais (GRACESON *et al.*, 2013).

Em nível mundial, aproximadamente 40% do consumo de energia está relacionado com a construção e manutenção de edifícios. Além disso, as construções são responsáveis por 33% das emissões de gases de efeito estufa em nível global. Portanto, temas como sustentabilidade e tecnologias ambientais de eficiência energética têm sido propostas e implementadas para o desenvolvimento de edifícios de consumo energético mais sustentável. Neste contexto, os telhados verdes são identificados como uma estratégia para tornar as edificações mais sustentáveis (BERARDI *et al.*, 2014).

Nos últimos dez anos, o número de pesquisas empíricas sobre telhados verdes se expandiu. Contudo, muitos aspectos relacionados à tecnologia e design de telhados verdes ainda não foram totalmente investigados ou otimizados. Em particular, o substrato do telhado verde, o qual é considerado o componente mais importante de um sistema de telhados verdes (YOUNG *et al.*, 2014).

Segundo Graceson *et al.* (2013), estudos já foram realizados referentes ao efeito de profundidade do substrato, à intensidade de precipitação e capacidade de água disponível sobre as capacidades de retenção de água em sistemas de telhados verdes. Contudo, o autor aponta que o efeito da composição do substrato em relação à capacidade de retenção de água tem recebido menos atenção.

Conforme a densidade urbana aumenta, conseqüentemente havendo uma maior quantidade de superfícies impermeáveis, o uso de telhados verdes pode tornar-se cada vez mais importante. Para avaliar o seu valor na estratégia de sistemas de drenagem urbana sustentável, no entanto, é necessário quantificar as propriedades físicas e hidráulicas do substrato, no sentido de avaliar as capacidades de retenção de água de sistemas de telhado verde (GRACESON *et al.*, 2013).

Diante do exposto, realizou-se este trabalho com o objetivo de avaliar diferentes substratos para telhados verdes em relação às suas propriedades físico-hidráulicas, principalmente sobre a capacidade de retenção de água pelo substrato. Avaliou-se o efeito das espécies vegetais de telhados verdes no potencial de escoamento superficial, utilizando o software Hydrus 1-D, e nas propriedades físico-hidráulicas de substratos no período de 18 meses (novembro de 2014, quando os telhados verdes foram instalados, e abril de 2016). Além disso, avaliou-se a função de pedotransferência Rosetta, acoplada ao programa Hydrus 1-D, para a determinação de propriedades hidráulicas para substratos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TELHADOS VERDES

#### 2.1.1 Definição

O telhado verde, também denominado como cobertura verde, telhado vivo ou ecotelhado (BERARDI *et al.*, 2014; VIJAYARAGHAVAN & RAJA, 2014) é definido como um telhado, deck ou outra estrutura, na qual vegetação é intencionalmente cultivada, ou são estabelecidos habitats para a vida selvagem (GREEN ROOF CODE, 2011).

O telhado verde é um sistema projetado de cobertura leve, que permite a propagação de vegetação na cobertura protegendo ao mesmo tempo a integridade do telhado subjacente (SPALA *et al.*, 2008).

A diferença entre os sistemas convencional de cobertura e de cobertura verde pode ser avaliada qualitativamente e quantitativamente. Há uma grande diferença no processo de transferência de calor entres as duas coberturas. A radiação solar, a temperatura externa e a umidade relativa são reduzidas ao passarem pela flora que cobre o telhado (SPALA *et al.*, 2008).

O telhado verde consiste em um sistema em camadas sobre um suporte. A peça diagonal de telhado verde começa a partir do ponto mais baixo por uma membrana a prova de água (membrana impermeabilizante e anti-raiz), a fim de proteger a edificação de vazamentos, sistema de drenagem (membrana de retenção de nutrientes, material de drenagem e filtro), substrato (meio de cultura) e vegetação (ROSSETI *et al.*, 2013). Além disso, quando o clima exige, é necessário um sistema de irrigação (CASTLETON *et al.*, 2010). O projeto de instalação estrutural do telhado verde pode ser alterado, e varia de acordo com a especificidade do sistema instalado (SPALA *et al.*, 2008; ROSSETI *et al.*, 2013). O projeto estrutural de um telhado verde é detalhado na Figura 1.

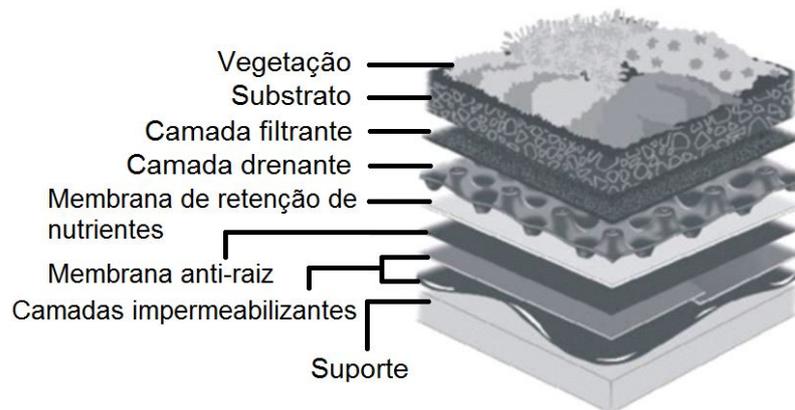


FIGURA 1 - Detalhes das camadas de telhado verde extensivo  
 FONTE: Adaptado de ROSSETI *et al.* (2013)

### 2.1.2 Tipos de Telhado Verde

A classificação dos telhados verdes é baseada principalmente na profundidade do substrato, além do tipo de vegetação, material de construção, gestão e utilização do telhado verde (BERARDI *et al.*, 2014).

#### **Telhado verde extensivo**

O telhado verde extensivo é um sistema de cobertura leve (CASTLETON *et al.*, 2010; GREEN ROOF CODE, 2011), em que a camada de substrato é rasa, sendo um valor variável próximo de 100 mm de profundidade (ROSSETI *et al.*, 2013; GREEN ROOF CODE, 2011), ou até no máximo 150 mm (VIJAYARAGHAVAN & RAJA, 2014). Após a aplicação e consolidação da vegetação no telhado verde extensivo, este não requer cuidados constantes ou especiais (ROSSETI *et al.*, 2013), sendo de baixa manutenção (SPALA *et al.*, 2008), e normalmente a irrigação não é necessária (GREEN ROOF CODE, 2011). A vegetação é constituída por plantas suculentas ou outras espécies de plantas resistentes, como a *Sedum* (GREEN ROOF CODE, 2011), e plantas rasteiras, como as gramíneas. O sistema de telhado verde extensivo é detalhado por camadas na Figura 2.

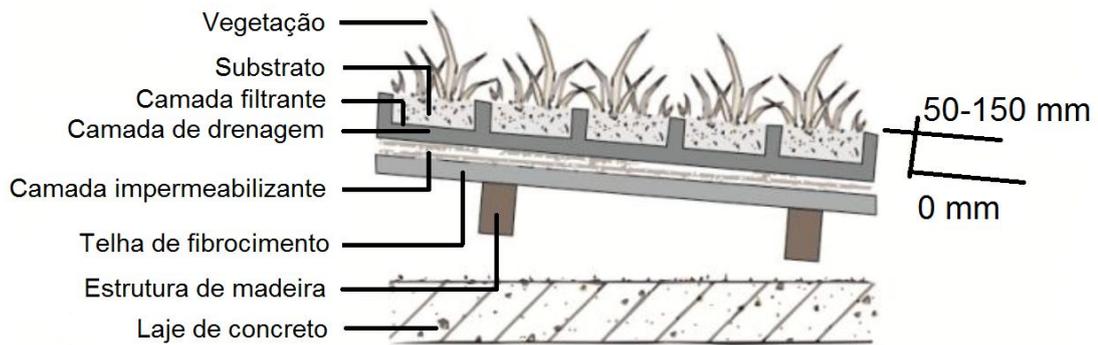


FIGURA 2 - Detalhe das camadas de telhado verde extensivo  
 Fonte: Adaptado de ROSSETI *et al.* (2013)

Os instaladores de telhados verdes extensivos limitam a profundidade do substrato substancialmente para reduzir o peso do sistema de telhado verde e o seu efeito sobre a capacidade de suporte de carga do edifício (GRACESON *et al.*, 2014).

É necessária uma camada drenante e retentora de água nos telhados verdes extensivos, capaz de eliminar a água excedente, a qual pode ser captada, possibilitando seu retorno para o sistema de irrigação da cobertura, se houver (ROSSETI *et al.*, 2013).

Telhados verdes extensivos servem como uma cobertura ecológica que fornece à sociedade os benefícios ambientais e, ao proprietário da edificação, benefícios de custo de ciclo de vida (GREEN ROOF CODE, 2011).

Telhados verdes extensivos são a melhor opção para adaptação em edifícios existentes, pois a capacidade estrutural muitas vezes não terá que ser aumentada, diminuindo os custos adicionais (CASTLETON *et al.*, 2010). Telhados verdes extensivos são apropriados para telhados de grande extensão, enquanto que o seu processo de instalação é tecnicamente simples e permite aplicação em telhados inclinados (BERARDI *et al.*, 2014), em que o ângulo de declive pode ser tão alto quanto 45° (MENTENS *et al.*, 2006).

O telhado verde extensivo é o sistema mais barato em relação aos outros tipos de sistemas em termos de instalação, bem como manutenção, pois ele pode ser auto sustentável (LI & YEUNG, 2014; SANTOS *et al.*, 2013).

### **Telhado verde semi-intensivo**

O telhado verde semi-intensivo é um sistema de telhado verde intermediário, possuindo características de ambos os telhados extensivo e intensivo. Exige uma profundidade de substrato entre 100 e 200 mm. Em comparação com os telhados extensivos, pode ser incluída uma gama maior de plantas, incluindo arbustos e plantas lenhosas. Necessidades de irrigação e de manutenção são dependentes das espécies vegetais plantadas (GREEN ROOF CODE, 2011).

### **Telhado verde intensivo**

Projetado principalmente para uso recreativo, o telhado verde intensivo oferece benefícios semelhantes ao de um pequeno parque urbano ou jardim interno, sendo muitas vezes referido como um jardim no terraço (GREEN ROOF CODE, 2011).

Telhados verdes intensivos requerem uma camada de substrato mais profunda, normalmente de 150 a 300 mm (ROSSETI *et al.*, 2013), ou maior que 200 mm (GREEN ROOF CODE, 2011), de acordo com a necessidade da vegetação (ROSSETI *et al.*, 2013), para permitir plantas mais profundas de enraizamento, como arbustos e árvores (CASTLETON *et al.*, 2011). Como há uma grande quantidade e variedade de plantas, o telhado verde intensivo exige manutenção metódica (SPALA *et al.*, 2008) e muitas vezes irrigação (GREEN ROOF CODE, 2011), o que resulta em uma desvantagem em relação ao telhado verde extensivo (SPALA *et al.*, 2008). O sistema de telhado verde intensivo por camadas é detalhado na Figura 3.

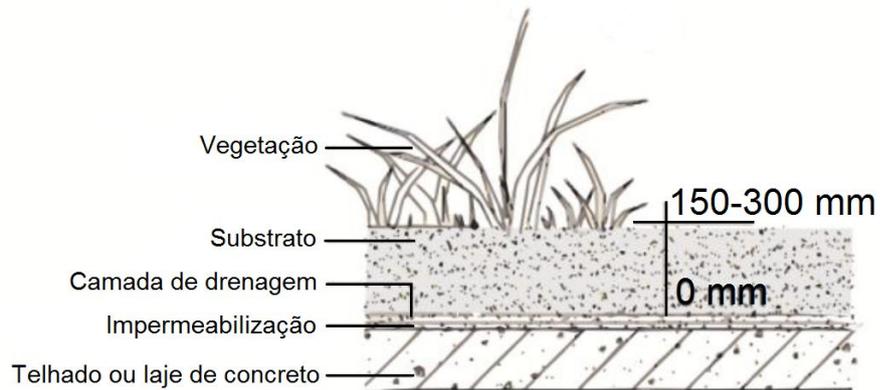


FIGURA 3 - Detalhe das camadas de telhado verde intensivo  
 Fonte: Adaptado de ROSSETI *et al.* (2013)

O telhado verde intensivo pode ser construído para diversas espécies de plantas para criar um ambiente natural atraente, com melhoria na biodiversidade, enquanto também proporciona espaço para recreação (BERARDI *et al.*, 2014).

Os telhados verdes intensivos possuem maior potencial para um melhor isolamento, reforço da gestão de águas pluviais e melhores performances energéticas, quando comparados às coberturas extensivas. Contudo, o seu grande peso requer uma estrutura reforçada, drenagem e irrigação, portanto, aumentando a complexidade técnica e os custos associados (BERARDI *et al.*, 2014).

Telhados verdes intensivos possuem inclinação menor que  $10^\circ$ , o que vai depender de sua concepção e acesso, pois podem ser utilizados como jardins de telhado para recreação (MENTENS *et al.*, 2006).

### 2.1.3 Benefícios Ambientais do Telhado Verde

#### **Drenagem sustentável**

A atenuação do escoamento de água pluviais pode ser estabelecido como o benefício ambiental mais importante de telhados verdes (BERARDI *et al.*, 2014). A retenção de água, através do armazenamento de água pelo substrato, e a evapotranspiração das plantas e do substrato do telhado verde, reduz os volumes de escoamento de águas pluviais, reduzindo a carga hídrica na rede de drenagem pluvial, e deste modo, reduzindo os custos de tratamento de água e esgoto (GREEN ROOF CODE, 2011; HILTEN *et al.*, 2008). Segundo Mentens *et al.* (2006), a

retenção de água em telhados verdes consiste em três etapas: atraso do tempo inicial de escoamento devido à absorção de água pelo sistema; atenuação do escoamento total pela retenção de uma parte da precipitação; e distribuição do escoamento ao longo de um grande período de tempo através da liberação relativamente lenta do excesso de água, o qual é temporariamente armazenado nos poros do substrato.

Os telhados verdes extensivos podem mitigar até 60% do escoamento de água da chuva, e em telhados verdes intensivos, esse valor pode chegar até 100% (BERARDI *et al.*, 2014). Contudo, o desempenho na retenção de água pode variar sazonalmente devido às diferenças nos padrões de precipitação, potencial de evapotranspiração e períodos secos antecedentes (GRACESON *et al.*, 2013), além da inclinação do telhado, e a espessura do substrato. De acordo com Santos *et al.* (2013), a quantidade de escoamento superficial é diminuída com a combinação de inclinação e espessuras médias reduzidas.

Mentens *et al.* (2006) analisaram a existência de relações entre precipitação e escoamento em escala de tempo anual e sazonal. Segundo os autores, a relação anual entre precipitação e escoamento superficial para telhados verdes é fortemente determinada pela profundidade da camada de substrato, e a retenção da água de chuva nos telhados verdes, em volume, é menor no inverno que no verão. Os autores associaram essa diferença de comportamento à distribuição da evapotranspiração e da precipitação.

A detenção de água realizada devido ao tempo para que a água infiltre e passe pelo substrato do telhado verde reduz as taxas de pico de escoamento de água, deste modo reduzindo o risco de inundações (GREEN ROOF CODE, 2011; HILTEN *et al.*, 2008).

Além destes benefícios, ainda há a melhoria da qualidade da água através da filtração de poluentes durante o processo de infiltração de água pelo substrato do telhado verde (GREEN ROOF CODE, 2011).

## **Biodiversidade**

Os telhados verdes podem substituir o habitat perdido devido ao desenvolvimento das zonas urbanas, ou criar habitats para incentivar uma maior biodiversidade de flora e fauna na área, fornecendo habitat para diversos invertebrados (GREEN ROOF CODE, 2011; BLANK *et al.*, 2013). Os telhados verdes também tem sido utilizados como área de repouso pelas aves de reprodução (BLANK *et al.*, 2013).

Se instalados de forma eficiente e integrados, os telhados verdes são alternativas válidas para substituir os espaços e habitats verdes que foram destruídos devido à modernização das cidades, proporcionando, portanto, de uma solução sustentável para a questão de falta de espaços verdes em zonas urbanizadas (BERARDI *et al.*, 2014).

## **Combate às alterações climáticas e ao efeito de ilha de calor urbano**

A vegetação pertencente aos sistemas de telhados verdes consome carbono durante a fotossíntese, retirando as emissões de um dos principais gases de efeito estufa, e deste modo, ajudando a deter a mudança climática. O resfriamento evaporativo das plantas também reverte o efeito do calor refletido associado com superfícies não vegetadas e impermeáveis, que contribuem para temperaturas mais elevadas e menor umidade do ar em relação às áreas circundantes, fenômeno conhecido como efeito de ilha de calor urbano (GREEN ROOF CODE, 2011; MENTENS *et al.*, 2006; BERARDI *et al.*, 2014).

De acordo com Castleton *et al.* (2010), a área exposta de um telhado negro (telhado convencional) pode chegar a 80°C, enquanto que a área equivalente de um telhado verde é de apenas 27°C. Os telhados verdes resfriam-se através da perda de calor latente e também pela maior refletividade da radiação solar.

A razão da radiação solar refletida e a radiação solar incidente é definida como albedo (CASTLETON *et al.*, 2010). Existe uma correlação negativa entre o efeito albedo e a temperatura da superfície: quanto maior o albedo, menor a temperatura da superfície (LI & YEUNG, 2014). Telhados verdes possuem um

albedo equivalente a 0,7-0,85, em comparação com os telhados convencionais de betume, alcatrão ou cascalho com um albedo típico de 0,1 a 0,2 (CASTLETON *et al.*, 2010; BERARDI *et al.*, 2014; LI & YEUNG, 2014).

Os telhados verdes influenciam positivamente no clima e microclima das zonas urbanizadas de modo bastante eficaz, como também no clima interior das construções. Além do sombreamento e proteção contra a radiação solar incidindo diretamente, os telhados verdes contribuem significativamente para a purificação do ar (SPALA *et al.*, 2008), devido ao aprisionamento de partículas e captação de gases poluidores (GREEN ROOF CODE, 2011).

### **Melhorias no desempenho da construção**

Em países desenvolvidos, os edifícios são responsáveis por cerca da metade do consumo de energia primária e, conseqüentemente, das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Uma grande parte desta energia é utilizada para sistemas de aquecimento e resfriamento dos edifícios (CASTLETON *et al.*, 2010).

Os telhados verdes podem reduzir a necessidade de sistemas de arrefecimento, como o ar condicionado, reduzindo a emissão de carbono, devido à combinações de fatores como o resfriamento e o aumento da massa térmica da construção. Esta massa adicional serve também como benefício na atenuação do som (GREEN ROOF CODE, 2011).

Os telhados verdes refletem entre 20% e 30% da radiação solar incidente, e absorvem até 60% por meio da fotossíntese. Isso significa que uma porcentagem inferior a 20% do calor é transmitida para o substrato (BERARDI *et al.*, 2014).

### **Saúde e bem estar**

Os telhados verdes podem beneficiar os ocupantes do edifício, fornecendo valiosas áreas de lazer ao ar livre adicionais, para uma variedade de usos possíveis, incluindo comodidade e lazer (GREEN ROOF CODE, 2011).

## Financeiro

Os telhados verdes podem ser vistos como retorno do investimento inicial de instalação por aumentarem a vida útil do telhado, devido ao telhado verde proteger a sua membrana, reduzindo as tensões térmicas induzidas pelos raios UV. Além disso, os custos de energia são reduzidos devido ao menor consumo de energia atribuído pelo efeito isolante da camada de substrato, vegetação e drenagem (GREEN ROOF CODE, 2011).

### 2.1.4 Histórico e exemplos

Hoje em dia, a líder mundial em tecnologias de telhado verde é a Alemanha (LI & YEUNG, 2014). A Alemanha é o país com maior proporção de telhados verdes, onde a indústria foi avaliada em UU\$ 77 milhões em 2008. Até 2010, existia uma área equivalente a 13,5 km<sup>2</sup> de telhados verdes na Alemanha, o que equivale a 14% de todos os telhados planos. Destes telhados verdes, 80% são coberturas extensivas, oferecendo uma solução mais rentável em relação ao telhado verde intensivo (CASTLETON *et al.*, 2010).

Os telhados verdes começaram a ser construídos na Alemanha já no final do século XIX, quando apenas menos de 1% dos telhados eram vegetados. Contudo, foram lançados programas de incentivo em 1983 até 1996 que exigiam a instalação de telhados verdes extensivos para edifícios localizados na parte central das cidades, permitindo uma redução nos custos adicionais de instalação (LI & YEUNG, 2014).

Em Tóquio, já existe uma lei obrigando a instalação de telhados verdes abrangendo pelo menos 20% de toda área de cobertura, em edifícios privados que possuam áreas construídas com mais de 1000 m<sup>2</sup>, e em edifícios públicos com áreas construídas com mais de 250 m<sup>2</sup> (BERARDI *et al.*, 2014).

Na Alemanha, o governo promove a ajuda na construção de 13,5 milhões de m<sup>2</sup> de telhados verdes por ano. Por exemplo, na cidade de Esslingen, 50% do custo na instalação do sistema de telhado verde são pagos pelo governo. Já na cidade de Darmstadt, os usuários podem receber até € 5000 por telhado verde instalado. Nas

ciudades de Bonn, Colônia e Mannheim, as taxas de coleta de drenagem de água pluvial são consideravelmente reduzidas quando um telhado verde é instalado (BERARDI *et al.*, 2014).

Telhados verdes também são comuns em outros países europeus, como a França e a Suíça (LI & YEUNG, 2014). Em Basileia, os usuários são reembolsados de 20% do custo da instalação de um telhado verde (BERARDI *et al.*, 2014).

No Canadá, Toronto também promoveu a construção ampla de telhados verdes como alternativas para combater os problemas ambientais urbanos (LI & YEUNG, 2014). Portanto, possuem políticas específicas para promover telhados verdes em edifícios com a proporção de 50 a 70% de toda a cobertura do edifício. Em Quebec, existe incentivo econômico fornecido por metro quadrado de telhado verde instalado (BERARDI *et al.*, 2014).

Nos Estados Unidos, a prefeitura da cidade de Portland realizou alguns programas de incentivo à instalação de telhados verdes em edifícios. Na região central de Portland, Oregon, estão sendo implementados telhados verdes em 70% do telhados existentes (BERARDI *et al.*, 2014; LI & YEUNG, 2014).

A França aprovou uma lei em 2015 que obriga todos os novos edifícios comerciais a instalarem telhados ecológicos ou painéis solares. A medida é parte da estratégia energética de reduzir a dependência das usinas nucleares que, atualmente, suprem cerca de 75% da demanda energética do país (REVISTA EXAME, 2015).

No Brasil, a Lei Municipal nº 18.112/2015 de Recife, em seu Art. 1º, aponta que "Os projetos de edificações habitacionais multifamiliares com mais de quatro pavimentos e não-habitacionais com mais de 400m<sup>2</sup> de área de cobertura deverão prever a implantação de "Telhado Verde" para sua aprovação". O objetivo desta Lei é aumentar as áreas verdes e diminuir os efeitos de ilha de calor urbano.

Na Câmara Municipal de São Paulo, há discussões sobre os telhados verdes principalmente na Frente Parlamentar pela Sustentabilidade. O Projeto de Lei 622/2008 prevê um desconto de 15% no IPTU dos imóveis que possuam telhados verdes. Outro projeto semelhante é o PL 388/2013, o qual requer desconto no imposto de até 25% para edifícios com mais de quatro pavimentos que adotem vegetação perene em parte ou totalidade de sua fachada (CÂMARA SP, 2015).

## 2.2 SUBSTRATOS

O termo substrato aplica-se a todo material poroso, natural ou artificial, colocado em um recipiente em forma pura ou em mistura, que permita a fixação do sistema radicular e que desempenha papel de suporte à planta (VALERO *et al.*, 2009). Os substratos diferem dos solos, por terem sido removidos dos seus locais de origem e serem produzidos artificialmente (MENEZES JÚNIOR *et al.*, 2000). Em comparação com os solos, substratos geralmente possuem melhores propriedades físicas e hidráulicas (como maior porosidade ou maior capacidade de retenção de água) de acordo com sua composição, e são bem drenados. Em contraste com solos minerais, há poucas informações na literatura sobre as propriedades hidráulicas de substratos (LONDRA, 2010).

Em relação ao crescimento e a atividade radicular, o substrato deve armazenar um determinado volume de água, sendo necessário também manter um teor de oxigênio adequado em torno das raízes. O teor de oxigênio é essencial para a respiração das raízes, pois deste modo as raízes podem suprir a energia necessária à absorção dos nutrientes, os quais a disponibilidade é regulada pelo substrato (ANDRIOLO *et al.*, 1999).

Portanto, por meio de sua fase sólida, o substrato garante a manutenção mecânica do sistema radicular e também a estabilidade da planta; por meio de sua fase líquida, permite o suprimento de água e nutrientes, e ainda por meio de sua fase gasosa, garante o suprimento de oxigênio e o transporte de dióxido de carbono entre as raízes e o ar externo (MENEZES JÚNIOR *et al.*, 2000).

Para uma melhor eficiência do telhado verde, é necessário que o substrato possua boas características de uniformidade, boa capacidade de retenção de água, aeração e drenagem, pois o substrato que irá possibilitar a boa formação do sistema radicular (SUGINO *et al.*, 2011).

Para o preparo do substrato, faz-se necessário conhecer a qualidade dos materiais que serão usados na sua composição. Para isso, examina-se as propriedades físicas e químicas dos materiais (SOUZA *et al.*, 2006).

Em relação às propriedades físicas, Verdonck (1983) relata que estas devem receber grande atenção, uma vez que as relações ar/água do substrato não podem ser modificadas durante o cultivo. Entre elas, destacam-se a densidade, a

porosidade total, o espaço de aeração e a capacidade de retenção de água (água disponível, água facilmente disponível, água tamponante e água remanescente) (MENEZES JÚNIOR *et al.*, 2000).

Quando os substratos são usados de forma pura, eles podem apresentar características indesejáveis à planta. Portanto, sugere-se utilizar o substrato em mistura (TRAZZI *et al.*, 2012). A alteração na composição dos componentes do substrato para telhado verde pode ter efeitos significativos sobre o desempenho fisiológico das plantas e sobre o balanço hídrico (YOUNG *et al.*, 2014).

Os substratos são formados por composições de diferentes matérias-primas e são classificados de acordo com o seu material de origem: origem vegetal (xaxim, esfagno, turfa, carvão, fibra de coco, casca de coco verde, pó de coco, maravalha); origem mineral (vermiculita, perlita, granito, calcário, areia, argila, cinasita); origem orgânica (esterco de aves, casca de eucalipto, casca de pinus, bagaço de cana, esterco bovino, húmus de minhoca); origem sintética (lã de rocha, espuma fenólica, isopor, biossólido). As matérias-primas de origem vegetal, principalmente a turfa, a qual é utilizada como padrão para comparação de novos materiais, e a de origem mineral, vermiculita, são os mais utilizados (FERRAZ *et al.*, 2005).

Quando utiliza-se materiais para a composição de um substrato do mesmo grupo, as características do substrato final obtido não sofrerão grandes alterações. Portanto, justifica-se o uso de, no máximo, três componentes em uma mistura de substratos para o telhado verde. Substratos adequados podem ser obtidos a partir da mistura de 70 a 80% de um material orgânico, com 20 a 30% de um componente para elevar a macroporosidade, como a casca de arroz carbonizada, cinza de caldeira de biomassa, bagaço de cana carbonizado, entre outros (GUERRINI & TRIGUEIRO, 2004).

O elevado conteúdo de nutrientes proveniente do aumento da fração orgânica nos substratos para telhado verde melhora o desenvolvimento do substrato a longo prazo devido a uma maior acumulação de biomassa morta, o que também ajuda na prevenção de que nutrientes sejam lixiviados para fora do sistema de telhado verde (YOUNG *et al.*, 2014).

No entanto, o uso da composição orgânica em substratos de telhados verdes deve ser limitado, pois o excesso de matéria orgânica pode promover o crescimento de ervas daninhas desnecessárias, e pôr em perigo o sucesso a longo prazo de todo o telhado. A porcentagem de matéria orgânica recomendada em

substratos de telhados extensivos é de 0 a 20% (VIJAYARAGHAVAN & RAJA, 2014).

### 2.2.1 Tipos de Substratos para Telhados Verdes

#### **Areia**

A areia é a fração da partícula sólida mineral do solo com diâmetro compreendido entre 0,05 e 2 mm de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), citada por Prevedello e Armindo (2015). De acordo com esta classificação, a areia pode ser dividida nas classes: areia fina 0,05-0,25 mm, areia média 0,25-0,5 mm e areia grossa 0,5-2 mm. A densidade da areia varia entre 1.350 e 1.800 kg/m<sup>3</sup>, e a sua porosidade em geral é inferior a 50% (SODRÉ *et al.*, 2007).

O uso da areia na composição de substratos possui algumas vantagens, como o baixo custo, fácil disponibilidade, estabilidade física, inatividade química e principalmente por permitir boa drenagem (PAULUS & PAULUS, 2007; SODRÉ *et al.*, 2007). Porém, quando na composição de substratos, a areia possui desvantagem em relação à sua alta densidade, o que dificulta o manejo, e sua baixa retenção de água. Além disso, a areia é pobre em nutrientes (PAULUS & PAULUS, 2007).

De acordo com Sodr e *et al.* (2007), para a preparação de substratos contendo areia,   necessário especificar a granulometria da areia usada, pois materiais com diferentes tamanhos irão modificar a porosidade e a capacidade de retenção de água do substrato. Segundo os autores, recomenda-se uma granulometria entre 0,5 e 2 mm de areia quando usada na composição para substratos.

Os autores Vijayaraghavan e Raja (2014) avaliaram a areia como um componente para substrato. Segundo os resultados obtidos, a areia, com tamanho de partícula de 0,25 a 1 mm, possui alta densidade seca (1608 kg/m<sup>3</sup>) e elevada densidade saturada (2040 kg/m<sup>3</sup>), ou seja, na máxima capacidade de retenção de  gua. Os autores ainda obtiveram os resultados de capacidade de retenção de água

de 30,5%, porosidade de aeração de 10,3% e condutividade hidráulica de 3850 mm/h.

Quando na composição de um substrato, resultados de Vijayaraghavan e Raja (2014) mostraram que a areia aumentou o peso do substrato, bem como a capacidade de retenção de água, porém diminuiu a porosidade. Apesar da areia ter aumentado o peso do substrato, ela proporcionou boa estabilidade para o substrato e boa ancoragem para as plantas.

O papel da areia na composição de um substrato é a diminuição de sua porosidade e de sua condutividade hidráulica (VIJAYARAGHAVAN & RAJA, 2014).

### **Argila**

A argila é a fração da partícula sólida mineral do solo com diâmetro menor que 0,002 mm de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), citada por Prevedello e Armindo (2015).

A argila expandida (Cinasita 0500) possui partículas relativamente grandes, de 0 a 5 mm, equivalente a areia grossa (CINEXPAN, 2016), sendo caracterizada por um substrato leve, semi-poroso e estéril (MEDINA FILHO *et al.*, 2004). Em geral, a sua densidade é de 850 kg/m<sup>3</sup> (CINEXPAN, 2016).

A argila expandida 0500 é um agregado nodulizado de argila formado por uma crosta microporosa rígida, com o interior constituído por uma massa cerâmica porosa. O processo geralmente é realizado em forno rotativo a uma temperatura de 1.100 °C (CINEXPAN, 2016).

### **Casca de arroz carbonizada**

O resíduo da indústria arrozeira é ainda um grande problema ambiental e o uso da casca de arroz carbonizada possibilita a destinação deste resíduo. A casca de arroz carbonizada é um componente barato para a composição de substrato, o que reduz o custo de produção da muda (SOUZA *et al.*, 2006).

A casca de arroz carbonizada é um material leve e inerte à hidratação (GUERRINI & TRIGUEIRO, 2004). Possui alta capacidade de drenagem e, portanto,

baixa capacidade de retenção de água (SOUZA *et al.*, 2006). A casca de arroz carbonizada possui baixa densidade, estando entre 150 a 250 kg/m<sup>3</sup> (SOUZA *et al.*, 2006). A casca de arroz carbonizada ainda possui pH levemente alcalino, boa disponibilidade de nutrientes, ausência de patógenos, além de não necessitar de tratamento químico para esterilização, devido à sua carbonização (PAULUS & PAULUS, 2007). A casca de arroz carbonizada destaca-se pelo seu elevado volume de aeração e por resistir à decomposição, mantendo a estabilidade do substrato (BOSA *et al.*, 2003).

O manejo da carbonização da casca de arroz deve ser realizado com cuidado, pois o processo é manual e, deste modo, as cascas são incineradas em proporções variáveis. Os grãos podem apresentar diferentes tamanhos e formatos em relação à variedade de arroz. Isto pode gerar uma diferença na granulometria do material, o que conseqüentemente irá se refletir em outras características físicas do substrato, como a porosidade e a capacidade de retenção de água (VIEIRA & PAULETTO, 2009).

Bosa *et al.* (2003) relatam que a casca de arroz carbonizada é um substrato impróprio para o cultivo de plantas, pois apresenta baixa salinidade.

### **Casca de pinus**

Por suas características físicas e biológicas, a casca de pinus é um material adequado para a utilização como substrato. Quanto menor a granulometria da casca de pinus, maior será a sua capacidade de retenção de água (MACHADO NETO *et al.*, 2005).

### **Esterco de aves curtido**

O esterco de aves é estabilizado biologicamente e pode trazer características interessantes quando na composição de um substrato. O esterco de aves, quando bem curtido, apresenta-se bem farelado, escuro e frio, muito rico em nitrogênio e matéria orgânica (TRAZZI *et al.*, 2012).

A matéria orgânica é um componente fundamental dos substratos, pois propicia o aumento na capacidade de retenção de água, redução na densidade, aumento da porosidade do meio, e mantém uma boa estrutura do substrato (TRAZZI *et al.*, 2012; GUERRINI & TRIGUEIRO, 2004; VIJAYARAGHAVAN & RAJA, 2014). Além destes atributos, a matéria orgânica ainda permite o desenvolvimento de microorganismos benéficos, aumentando, deste modo, a disponibilidade de nutrientes às plantas, o pH e a capacidade catiônica (VIJAYARAGHAVAN & RAJA, 2014). Contudo, estes benefícios dependem da quantidade e qualidade do produto utilizado (TRAZZI *et al.*, 2012).

### **Serragem**

A qualidade da serragem depende de vários fatores, como o tipo da madeira, o tempo e a condição de armazenamento, além do teor de tanino presente (SODRÉ *et al.*, 2007).

A serragem pode ser utilizada sem a necessidade de se realizar a compostagem de acordo com o seu tempo de armazenamento, porém serragens, ainda que sejam envelhecidas e naturalmente estabilizadas, podem apresentar fermentação ácida e prejudicar o crescimento das plantas (SODRÉ *et al.*, 2007).

De acordo com Sodré *et al.* (2007), substratos que possuam alto percentual de serragem na sua composi o podem apresentar problemas em rela o   alta reten o de umidade. Portanto, os autores recomendam que sejam realizadas misturas com materiais de maior diâmetro e que tenham menor capacidade de reten o de água, para que se aumente a drenagem e se reduza o acúmulo de  gua.

### **Turfa**

A turfa   um material orgânico abundante nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (SCHMITZ *et al.*, 2002).

Por apresentar excelentes características físicas, a turfa   consagrada internacionalmente por seu uso como material orgânico na composi o de

substratos, sendo utilizada como padrão de comparação no estudo de novos materiais para substrato (SCHMITZ *et al.*, 2002). Contudo, na Europa existe a preocupação em se desenvolver novos substratos a fim de substituir a utilização da turfa, pois se trata de um recurso natural não renovável (CARRIJO *et al.*, 2004). O uso da turfa como substrato tem sido ecologicamente questionado, uma vez que além de não ser um material renovável a curto prazo, exige custos adicionais de remoção e transporte, fazendo com que a turfa seja um substrato caro (MENEZES JÚNIOR *et al.*, 2000).

A turfa possui alta capacidade de retenção de água (SOUZA *et al.*, 2006) e menor espaço de aeração (BOSA *et al.*, 2003).

### 2.2.2 Relações Área-massa-volume

Meios porosos, como o substrato, são constituídos pelas fases sólida, líquida e gasosa, conforme esquematizado na Figura 4. Os índices subscritos s, ag, ar e p correspondem, respectivamente, sólido, água, ar e poros.

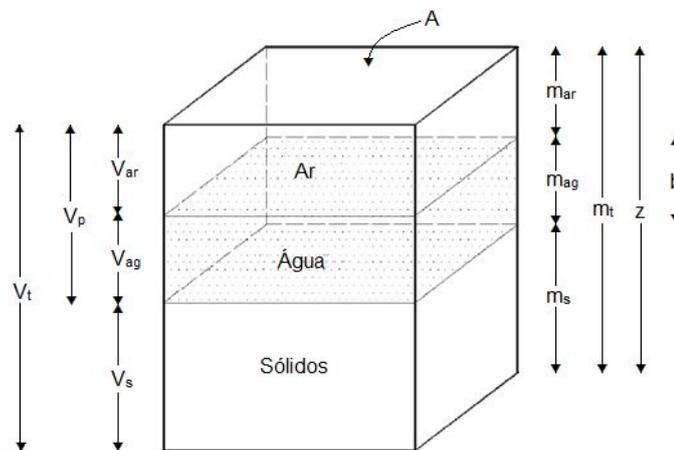


FIGURA 4 - Esquema de um volume genérico de meios porosos como um sistema multicomponente  
Fonte: Adaptado de PREVEDELLO & ARMINDO (2015)

### Porosidade

A porosidade é essencial para o crescimento da vegetação, uma vez que a elevada formação de raízes exige um alto fornecimento de oxigênio e uma rápida saída do gás carbônico formado pelas plantas. Deste modo, o substrato de telhado verde deve ser suficientemente poroso, para que possa permitir trocas gasosas mais

eficientes, evitando a falta de ar para a respiração das raízes (TRAZZI *et al.*, 2012; KRATZ *et al.*, 2013).

Os poros do substrato diferem em tamanho e forma. Libardi (2005) define o tamanho de poro do solo como o diâmetro da maior esfera inscrita no interior do espaço ocupado pelo poro. Por este motivo, os poros são classificados de acordo com seu diâmetro, como mostra a Tabela 1.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS POROS DO SOLO COM BASE NO DIÂMETRO

Classes de Poros	Diâmetro, $\Phi$ ( $\mu\text{m}$ )
macroporos	> 300
mesoporos	50 - 300
microporos	< 50

FONTE: PREVEDELLO & ARMINDO (2015).

A principal função dos macroporos é a aeração da matriz do substrato e a condução de água durante o processo de infiltração. Portanto, os macroporos afetam a aeração e a drenagem. Após a infiltração, em que os macroporos são esvaziados, os mesoporos possuem a função de condução de água durante o processo de redistribuição. Já os microporos atuam na armazenagem de água. Nestes poros, a água se move, mas muito lentamente (LIBARDI, 2005).

Em um substrato, macroporos são os espaços nos quais, logo após a drenagem livre de água, enchem-se de ar. Os mesoporos são aqueles em que há água disponível quando a tensão é de 100 hPa. Microporos são aqueles em que há disponibilidade de água em tensões superiores ou iguais a 100 hPa (SUGINO *et al.*, 2011).

A distribuição dos poros no substrato desempenha papel fundamental nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, determinando a evolução espacial e temporal dos processos envolvidos pelo movimento hídrico. Assim, o comportamento físico-hídrico fica condicionado à distribuição dos poros e à variação de suas dimensões (SUGINO *et al.*, 2011).

Os poros internos do substrato, geralmente de pequeno diâmetro, são capazes de reter água a tensões mais altas que a tensão na amostra saturada, a qual é determinada pela profundidade do substrato. Deste modo, substratos com partículas grandes e com poros internos abertos asseguram água disponível a tensões muito baixas e altos níveis de aeração (FERMINO, 2003).

## **Macroporosidade**

Aumentando-se a densidade do substrato, diminui-se a macroporosidade do mesmo (GUERRINI & TRIGUEIRO, 2004). Composições de substrato que diminuam excessivamente sua macroporosidade promovem condições desfavoráveis para a germinação das sementes, estabelecimento e crescimento da vegetação, pois, ao aumentar a quantidade de microporos, diminui-se a aeração no interior do substrato (SUGINO *et al.*, 2011).

A macroporosidade é altamente correlacionada com a aeração e drenagem do substrato (GUERRINI & TRIGUEIRO, 2004).

## **Microporosidade**

Substratos com muitas partículas pequenas (até 1 mm) possuem maior capacidade de retenção de água, pois diminui-se a porosidade total, promovendo o aumento do número de microporos, os quais são responsáveis pela retenção de água. Esse fato demonstra a importância da distribuição de partículas de diferentes dimensões na composição de um substrato (SUGINO *et al.*, 2011).

A microporosidade é altamente correlacionada com a retenção de água e nutrientes do substrato (GUERRINI & TRIGUEIRO, 2004).

## **Granulometria**

A distribuição do tamanho de partícula é essencial para a descrição da qualidade física do substrato e a sua adequabilidade para o crescimento da vegetação. A distribuição do tamanho de partícula do substrato influencia o volume de ar e de água retida pelo substrato, e pode variar de acordo com a sua origem e condições de moagens, entre outros fatores (FERNANDES & CORÁ, 2004).

Maiores tamanhos de partículas com poros grandes aumentam a aeração do meio e, portanto, reduzem a capacidade de retenção de água. No entanto, um substrato com partículas de tamanho reduzido e poros menores, retém mais água,

inclusive a água dificilmente disponível à vegetação, porém a aeração do meio é deficiente (YOUNG *et al.*, 2014; ZORZETO, 2011). Substratos que são constituídos por partículas muito grandes, acima de 25% de sua composição, apresentam reduzida fração de água facilmente disponível (BARRETO *et al.*, 2012).

O substrato considerado ideal é constituído por partículas médias a grossas, com distribuição de poros entre 30 e 300  $\mu\text{m}$ , fazendo com que haja um equilíbrio entre a água disponível e a aeração para a vegetação do sistema (ZORZETO, 2011).

### **Densidade do substrato seco**

A densidade do substrato, também denominada como densidade aparente, é definida como a relação da massa seca com o seu volume. Valores de densidade são necessários para converter o conteúdo gravimétrico de água no substrato para o conteúdo volumétrico, e para calcular a porosidade do substrato. A densidade é uma propriedade básica e dinâmica do substrato que varia de acordo com o estado estrutural do substrato (ASKIN & ÖZDEMIR, 2003).

A densidade deve ser medida adequadamente, pois suas medições são essenciais para o cálculo e compreensão de outras propriedades físicas dos substratos, como a porosidade total, o espaço de aeração e a água disponível (FERNANDES & CORÁ, 2004).

De acordo com Fermino (2003), os valores de referência de densidade para um substrato seco estão entre 400 e 500  $\text{kg}/\text{m}^3$ . O valor da densidade seca pode ser avaliado como um indicativo da massa dos sólidos presentes na amostra analisada (FERMINO & KÄMPF, 2012).

Em geral, quando aumenta-se o valor da densidade, diminui-se a porosidade total e o espaço de aeração, e aumenta-se a água tamponante e a água remanescente. Estes resultados estão associados com o aumento da massa do substrato, pois devido a este aumento, as partículas ocupam o espaço do ar, causando a redução da porosidade total, e a distribuição de tamanho de poros é alterada (FERNANDES & CORÁ, 2004).

### Densidade das partículas

A densidade das partículas, também denominada como densidade real, expressa a relação entre a massa de partículas sólidas e o volume real ocupado por essas partículas, portanto, o espaço ocupado pelos poros não é incluído (ZORZETO, 2011; FERMINO, 2003).

Partículas minerais apresentam densidade de partículas de 2,65 g/cm<sup>3</sup> e de matéria orgânica, 1,45 g/cm<sup>3</sup> (FERMINO, 2003).

### Umidade gravimétrica

O teor de umidade inicial do substrato tem influência na acomodação das partículas e, conseqüentemente, no volume de substrato utilizado no telhado verde. Isto é particularmente observado em materiais com altos teores de matéria orgânica, como aqueles a base de turfa e casca de pinus (FERMINO, 2003).

A umidade gravimétrica para substratos é com base na massa úmida da amostra. De acordo com Fermino e Kämpf (2012), a umidade gravimétrica pode ser obtida por,

$$U = \frac{m_u - m_s}{m_u} \quad (1)$$

Em que:

U: umidade gravimétrica, kg<sub>água</sub>/kg<sub>substrato úmido</sub>;

m<sub>u</sub>: massa úmida, kg;

m<sub>s</sub>: massa seca, kg.

### Umidade volumétrica

De acordo com Prevedello & Armino (2015), a umidade volumétrica de meios porosos, relacionada pelo volume de água presente em uma amostra com o seu volume total, pode ser determinada de acordo com a equação (2).

$$\theta = \frac{V_{ag}}{V_t} \quad (2)$$

Em que:

$\theta$ : umidade volumétrica,  $m^3_{\text{água}}/m^3_{\text{substrato}}$ ;

$V_{ag}$ : volume de água na amostra,  $m^3$ ;

$V_t$ : volume total da amostra,  $m^3$ .

### Umidade atual

A umidade atual é definida pela Instrução Normativa nº 17 da MAPA (2007) como,

$$UA = \frac{m_u - m_s}{m_u} \quad (3)$$

Em que:

UA: umidade atual,  $kg_{\text{água}}/kg_{\text{substrato úmido}}$ ;

$m_u$ : massa úmida, kg;

$m_s$ : massa seca, kg.

A umidade atual, a qual reflete a umidade presente na amostra no momento de sua coleta, também pode ser expressa em porcentagem.

### Lâmina de armazenamento

O armazenamento de água representa a lâmina de água que está sendo armazenada na amostra de altura  $z$  (PREVEDELLO & ARMINDO, 2015). Portanto,

$$\bar{Z} = \theta \cdot z \quad (4)$$

Em que:

$\bar{Z}$ : lâmina de água, m;

$\theta$ : umidade volumétrica,  $m^3/m^3$ ;

$z$ : perfil do substrato, m.

### 2.2.3 Propriedades Físicas

#### Densidade úmida

A densidade úmida expressa a relação entre a massa total do substrato e o volume total do substrato, descrito pela equação (5). Para meios porosos, na densidade úmida, consideram-se todas as fases (sólida, líquida e gasosa) (PREVEDELLO & ARMINDO, 2015).

$$d_u = \frac{m_u}{V_t} \quad (5)$$

Em que:

$d_u$ : densidade úmida, kg/m<sup>3</sup>;

$m_t$ : massa úmida, kg;

$V_t$ : volume total, m<sup>3</sup>.

#### Densidade seca

A densidade seca expressa a relação entre a massa do substrato (incluindo o espaço de poros) e o volume de uma amostra de substrato (ZORZETO, 2011). A densidade seca pode ser definida como a razão entre a massa seca e o volume total do substrato, ou seja,

$$d_s = \frac{m_s}{V_t} \quad (6)$$

Em que:

$d_s$ : densidade seca, kg/m<sup>3</sup>;

$m_s$ : massa seca, kg;

$V_t$ : volume total, m<sup>3</sup>.

Quanto maior o valor da densidade seca do substrato, menor é a porosidade total do substrato.

### Densidade das partículas sólidas

A densidade das partículas sólidas do substrato é definida como a razão entre a massa seca (massa de sólidos) e o volume de sólidos do substrato, ou seja,

$$d_p = \frac{m_s}{V_s} \quad (7)$$

Em que:

$d_p$ : densidade das partículas, kg/m<sup>3</sup>;

$m_s$ : massa seca, kg;

$V_s$ : volume dos sólidos, m<sup>3</sup>.

### Porosidade total

A porosidade total expressa o volume do meio não ocupado pela fração sólida (partículas) e pode ser quantificada pela medida da quantidade de água retida na saturação, ou seja, na tensão 0 hPa (FERMINO, 2003; ZORZETO, 2011). Portanto, a porosidade total é o conteúdo de volume de água em condição saturada, e também definida como a fração volumétrica total dos poros do substrato (FERNANDES & CORÁ, 2004). Esta propriedade é variável com o passar do tempo de cultivo devido à acomodação das partículas do substrato (FERMINO, 2003).

A porosidade total é a razão entre o volume total de poros e o volume total de sólidos de uma amostra de substrato (ZORZETO, 2011), descrito na equação (8).

$$\alpha = \frac{V_p}{V_t} \quad (8)$$

Em que:

$\alpha$ : porosidade total, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$V_p$ : volume total de poros, m<sup>3</sup>;

$V_t$ : volume total, m<sup>3</sup>.

Segundo Bosa *et al.* (2003) e Souza *et al.* (2006), o valor de porosidade total considerado ideal para o substrato é de 0,80-0,90 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, equivalente a 80 a 90%, para todos os substratos. O valor de 85% (0,85 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), de acordo com De Boodt e Verdonck (1972), tornou-se referência internacional para porosidade total de substratos.

### Porosidade de aeração ou livre de água

A porosidade de aeração, também denominada de espaço de aeração, é um índice que revela quanto do volume da amostra do meio poroso é ocupado por ar (LIBARDI, 2005). Esta propriedade pode ser definida como a razão entre o volume de ar no substrato e o volume total do substrato, ou seja,

$$\alpha_{ar} = \frac{V_{ar}}{V_t} \quad (9)$$

Em que:

$\alpha_{ar}$ : porosidade de aeração, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$V_{ar}$ : volume de ar, m<sup>3</sup>;

$V_t$ : volume total, m<sup>3</sup>.

De acordo com Prevedello e Armindo (2015), a porosidade de aeração é uma parte da porosidade total, excluindo-se a porosidade ocupada pela água do meio poroso, a qual é a própria fração volumétrica de água, ou seja,

$$\alpha_{ar} = \alpha - \theta \quad (10)$$

Em que:

$\alpha_{ar}$ : porosidade de aeração, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$\alpha$ : porosidade total, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$\theta$ : umidade volumétrica, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

A porosidade de aeração é caracterizada como o volume de macroporos preenchidos com ar, em condições de saturação de água e após livre drenagem (VALERO *et al.*, 2009).

De acordo com as orientações alemãs FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) (FLL, 2002), para substratos de telhado verde extensivo, a porosidade de aeração deve ser maior que 10%.

A escolha do substrato em relação ao seu valor de porosidade de aeração deve ser realizada considerando-se a espécie cultivada, a frequência e o tipo de irrigação, além das características do ambiente de cultivo, se natural ou protegido (FERMINO, 2003).

## 2.2.4 Propriedades e Funções Hidráulicas de Meios Porosos

### **Curva de retenção de água**

As raízes da vegetação exercem uma pressão (tensão) no substrato devido à evaporação de água na superfície das folhas pela transpiração (evapotranspiração) (ZORZETO, 2011). A capacidade de retenção de água de um substrato fornece informações sobre a habilidade para reter e liberar água e o volume de água disponível às plantas sob baixas tensões (FERMINO, 2003).

De acordo com Vijayaraghavan e Raja (2014), a alta capacidade de retenção de água é uma vantagem, uma vez que permite que o substrato armazene água, assim, diminuindo o volume de escoamento dos telhados verdes. Além disso, a água armazenada viabiliza a disponibilidade de água para as plantas em condições de seca.

A curva de retenção de água do substrato é resultado da relação entre a umidade volumétrica e a tensão mátrica da água no substrato (FERMINO, 2003). Dessa forma, a determinação da curva de retenção é importante, pois expressa a água disponível para as plantas em certas tensões (FERNANDES & CORÁ, 2004). Por meio da definição dela, permite-se o conhecimento da quantidade de água a ser aplicada em uma espécie de planta específica (VALERO *et al.*, 2009). Se o substrato reter água em demasia, haverá deficiência de oxigênio no substrato (SOUZA *et al.*, 2006).

O método mais difundido para a avaliação da distribuição volumétrica de ar e água nos substratos é o desenvolvido por De Boodt e Verdonck (1972). De acordo com esses autores, para a avaliação dos volumes de ar e água dos substratos devem-se analisar três valores de tensão, 10, 50 e 100 hPa (CORÁ & FERNANDES, 2008).

O funil de Haines (HAINES, 1930), mais conhecido como funil de placa porosa, detalhado na Figura 5, é um equipamento utilizado para determinar a umidade que permanece em uma amostra volumétrica de substrato após a aplicação de uma determinada tensão (CÁSSARO *et al.*, 2008).

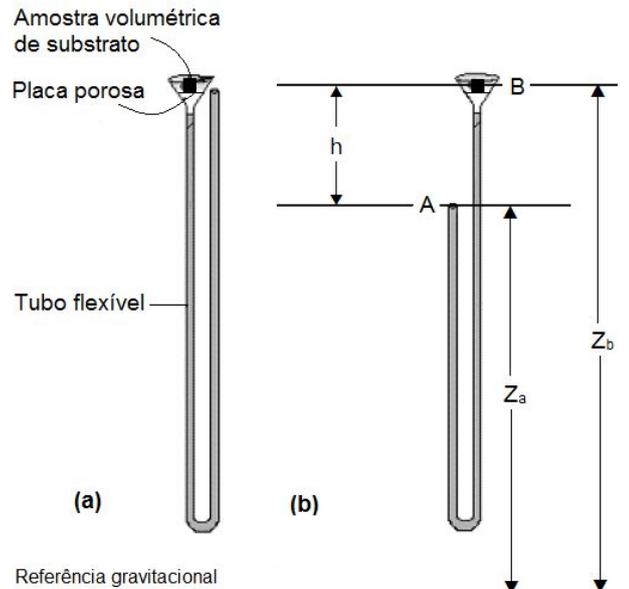


FIGURA 5 - ESQUEMA DO FUNIL DE HAINES. a) Equipamento na posição zero (saturação). b) Equipamento na posição  $h$ .  
Fonte: Adaptado de Cássaro *et al.* 2008

De acordo com o procedimento descrito por Cássaro *et al.* (2008), para a medida da umidade em certa tensão mátrica por meio de um funil de Haines, coloca-se uma amostra volumétrica saturada em contato hidráulico com a placa porosa, mantendo-se o nível do tubo flexível no centro geométrico da amostra. Após o contato hidráulico ser estabelecido, abaixa-se a mangueira flexível até um valor de uma altura  $h$  desejada, como na Figura 5b.

Com o desnível gerado, ocorrerá a drenagem da água presente na amostra volumétrica, por meio do tubo flexível, até que a condição de equilíbrio seja alcançada, momento em que a drenagem de água cessa. Na condição de equilíbrio, o potencial total ( $\psi_t$ ), ou seja, a soma dos potenciais de pressão, mátrico e gravitacional, em qualquer ponto do lado da solução do substrato (ponto A) será igual ao potencial total em qualquer ponto da amostra volumétrica de substrato (ponto B), a qual agora não está mais saturada (CÁSSARO *et al.*, 2008). Este procedimento pode ser observado na Figura 5b.

Assim, uma curva de retenção da água de meios porosos é obtida variando-se o valor de  $h$  (altura do tubo flexível) e medindo-se a umidade que permanece na amostra para cada valor deste  $h$  (Libardi, 2005).

O modelo de van Genuchten (1980) é um modelo empírico para obter a relação existente entre a umidade e as tensões exercidas em meios porosos, sendo obtida por,

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha|h|)^n\right]^m} \quad (11)$$

Em que:

$\theta$ : umidade volumétrica atual, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$\theta_r$ : umidade volumétrica residual, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;

$h$ : potencial mátrico, hPa;

$\alpha$ : parâmetro de ajuste do modelo, hPa<sup>-1</sup>,

$n$  e  $m$ : parâmetros de ajuste do modelo, adimensionais;

Os parâmetros de ajuste do modelo (empíricos)  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  da Equação (11) podem ser estimados mediante utilização de recursos computacionais considerando ou não a restrição de Mualem (1976) [ $m = 1 - (1/n)$ ].

### **Espaço de aeração**

De Boodt e Verdonck (1972) definem espaço de aeração como o volume de ar presente no substrato drenado após sua saturação em condições equivalentes à tensão de uma coluna de água de 10 cm de altura (10 hPa), em laboratório.

Os valores referenciais sugeridos em literatura para o espaço de aeração situam-se entre 20 e 40% (0,20 e 0,40 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) do volume (DE BOODT & VERDONCK, 1972). Segundo Carrijo *et al.* (2004), o valor considerado ideal para o espaço de aeração de um substrato é de 0,10-0,40 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. De acordo com Souza *et al.* (2006), o valor de referência do espaço de aeração é de 30 a 40%.

### **Água facilmente disponível**

Em baixas tensões, a vegetação consegue facilmente extrair a água retida nos macroporos do substrato, os quais passam a ser ocupados por ar (ZORZETO, 2011). A água facilmente disponível é definida como o volume relativo de água liberado entre 10 e 50hPa de tensão (FERNANDES & CORÁ, 2004; CARRIJO *et al.*, 2004; FERMINO, 2003).

Para classificar um substrato como de boa qualidade, a água facilmente disponível deve estar entre 20 a 30% da umidade volumétrica (CARRIJO et al., 2004; FERMINO, 2003).

### **Água tamponante**

A água tamponante é definida como a umidade presente entre as tensões de 50 e 100hPa (FERNANDES & CORÁ, 2004; CARRIJO et al., 2004). Estima-se que 4 a 10% (0,4 a 0,10 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) seja um valor de referência. O volume liberado acima dessa tensão (100hPa) é considerado água dificilmente disponível, remanescente ou residual (FERMINO, 2003).

### **Água remanescente**

Aumentando-se a tensão aplicada, as plantas precisam de mais energia para extrair a água, podendo chegar a uma situação em que a planta murcha durante o dia, em consequência de temperaturas elevadas, e se recupera à noite, quando a perda de água por evapotranspiração é reduzida. Se essa situação for contínua, a vegetação não dispõe de energia suficiente para continuar realizando a extração de água retida no substrato, e assim, o ponto de murcha permanente (PMP) é alcançado. Na condição de PMP, a vegetação murcha de forma permanente, sem recuperar-se à noite (ZORZETO, 2011).

De Boodt e Verdonck (1972) realizaram análises com a vegetação *Ficus*, e observaram que as vegetações não apresentaram condições ótimas de desenvolvimento quando a tensão mátrica do substrato foi superior que 100 hPa. Deste modo, a tensão de 100 hPa foi definida como a tensão limite correspondente ao volume de água retido que está indisponível à planta, sendo denominada de água remanescente do substrato, ou ponto de murcha permanente (FERNANDES & CORÁ, 2004).

De acordo com Souza *et al.* (2006), para a água remanescente, o valor de referência é de 20 a 30% da umidade volumétrica.

## Água disponível

Em condições de saturação hídrica e após livre drenagem, a água disponível refere-se aos microporos preenchidos com água entre tensões de 10 e 100hPa (VALERO *et al.*, 2009; FERNANDES & CORÁ, 2004). Portanto, a água disponível é a soma da água facilmente disponível e a água tamponante.

De acordo com Souza *et al.* (2006), para a água disponível, os valores de referência para substratos são de 24 a 40%.

## Permeabilidade hidráulica do substrato saturado

Segundo Prevedello e Armindo (2015), o coeficiente de permeabilidade hidráulica, K, expressa a permeabilidade do meio poroso à passagem de água. Esta propriedade é relacionada na Lei de Darcy, de acordo com

$$q = \frac{V}{At} = -K \frac{dh}{ds} \quad (12)$$

Em que:

q: densidade de fluxo, m/s;

K: coeficiente de permeabilidade hidráulica, m/s;

dh/ds: gradiente de potencial hidráulico, m/m;

h: potencial hidráulico, m;

s: coordenada da posição, m.

De acordo com as orientações alemãs FLL (2002), a permeabilidade hidráulica de substratos de telhado verde deve ser maior que 3600 mm/h.

## Permeabilidade hidráulica do substrato insaturado

Com a obtenção da permeabilidade hidráulica do substrato saturado, é possível estimar os valores da permeabilidade hidráulica em diferentes umidades, de acordo com a equação (13) do modelo de van Genuchten-Mualem,

$$K(\theta) = K \left\{ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left[ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right]^2 \right\} \quad (13)$$

Em que:

$K(\theta)$ : permeabilidade do meio poroso insaturado, m/s;

$K$ : permeabilidade hidráulica do meio poroso saturado, m/s;

$\theta$ : umidade volumétrica atual,  $m^3/m^3$ ;

$\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação,  $m^3/m^3$ ;

$\theta_r$ : umidade volumétrica residual,  $m^3/m^3$ ;

$m$ : constante empírica da Eq. (11), adimensional.

### 2.2.5 HYDRUS 1-D

Hydrus 1-D consiste de um código para simulação unidimensional do movimento de água, calor, e solutos múltiplos em meios porosos saturados variáveis (SIMUNEK *et al.*, 2009). O procedimento para uma simulação no programa Hydrus 1-D é detalhado a seguir.

No menu de pré-processamento, em que especifica-se os principais processos a serem simulados, há as seguintes opções:

- a) Fluxo de água, que quando selecionada, pode-se simular o fluxo de vapor;
- b) Transporte de solutos;
- c) Transporte de calor;
- d) Absorção de água pela raiz, que quando selecionada pode-se simular o crescimento da raiz;
- e) Transporte de CO<sub>2</sub>.

Para as informações da geometria do meio poroso, primeiramente deve-se selecionar a unidade de comprimento (mm, cm, m) que será utilizada em toda a simulação. Em seguida, devem ser introduzidas as seguintes informações:

- a) Profundidade do perfil do solo: especifica a profundidade do perfil do solo utilizado posteriormente no módulo perfil para discretização e especificação das condições iniciais e da distribuição das propriedades no domínio;

- b) Número de materiais (componentes): o número de componentes de solo devem ser especificados para o fluxo do sistema.
- c) Número de subregiões (camadas): número de camadas do solo para cada balanço hídrico e de soluto que serão simulados.
- d) Declinação da vertical: permite ao usuário escolher um perfil de solo vertical e/ou horizontal. Qualquer direção inclinada do perfil é permitida. A inclinação é especificada em termos do cosseno do ângulo entre o eixo vertical e o eixo do perfil do solo. O seu valor é igual a um para colunas de solo vertical, e zero para colunas de solo horizontais.

Para as informações sobre o tempo de simulação, primeiramente deve-se selecionar a unidade de tempo (segundos, minutos, horas, dias, anos) que será utilizada em todo o programa. Em seguida, devem ser introduzidas as seguintes informações:

- a) Discretização do tempo: especifica as principais variáveis que governam a discretização do tempo;
- b) Tempo inicial: tempo inicial do cálculo [T];
- c) Tempo final: tempo final do cálculo [T];
- d) Passo de tempo inicial: incremento de tempo inicial,  $dt$  [T]. O valor recomendado para o intervalo de tempo inicial depende do tipo de simulação e condições de contorno utilizadas. Ao simular um processo de longo período com condições de contorno variáveis (por exemplo, simulação sazonal ou plurianual), deve-se começar com um intervalo de tempo maior (por exemplo, 15 min);
- e) Passo mínimo do tempo: valor mínimo do incremento de tempo permitido,  $dt_{\min}$  [T]. O passo de tempo mínimo deve ser menor que i) o intervalo de tempo inicial, ii) intervalo entre os tempos de impressão e, iii) intervalo entre registros de condições de contorno de tempo variável. Deve-se sempre especificar um intervalo de tempo mínimo pequeno, na ordem de 1 s. Este valor pode não ser utilizado, mas fornece ao código a flexibilidade quando for necessário, por exemplo, quando há uma alteração repentina nos fluxos de contorno e o Hydrus poderá não convergir com intervalos de tempo maiores;
- f) Passo máximo do tempo: valor máximo do incremento de tempo permitido,  $dt_{\max}$  [T]. Este parâmetro possui pouca importância e um

grande valor pode ser especificado. Como o Hydrus seleciona o passo de tempo ótimo automaticamente, geralmente não há necessidade de colocar alguma restrição. O único momento em que há necessidade de restringir o intervalo de tempo é provável para os casos quando é solicitado para que o Hydrus gere internamente variações intra-diários da temperatura, ou em fluxos de evaporação e transpiração. Para estes casos, há uma necessidade de dispor de um intervalo de tempo menor (por exemplo, 1h). O valor recomendado seria, então, cerca de 1/20 do intervalo de tempo (dia, ano).

Ainda nas informações sobre o tempo, pode-se inserir as condições de contorno variáveis (dependentes) no tempo:

- a) Condições de contorno dependentes do tempo: o número de registros de condições dependentes do tempo e suas condições de contorno dependentes do tempo associadas devem ser especificadas quando este quadro é selecionado. Caso contrário, as condições de contorno são consideradas constantes no tempo.
- b) Dados meteorológicos: alternativamente, a evapotranspiração pode ser calculada utilizando as equações recomendadas pela FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura), equação de Penman-Montheith, equação de Hargreaves, ou pela resolução do balanço de energia superficial.

A equação de Hargreaves requer poucos parâmetros de entrada, incluindo as temperaturas média, mínima e máxima, e a radiação extraterrestre para cálculos de evapotranspiração potencial (HILTEN *et al.*, 2008). A equação de Hargreaves é

$$ET_0 = 0.023 \cdot R_a (T_{\text{méd}} + 17.8) (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0.5} \quad (14)$$

Em que:

$ET_0$ : evapotranspiração potencial, mm/dia;

$R_a$ : radiação extraterrestre, ou no topo da atmosfera, mm/dia;

$T_{\text{méd}}$ : temperatura média, °C;

$T_{\text{máx}}$ : temperatura máxima, °C;

$T_{\text{mín}}$ : temperatura mínima, °C.

Para o modelo hidráulico, utiliza-se, em geral, o modelo de van Genuchten (1980) com a condição de Mualem (1976).

Em seguida, é necessário entrar com os parâmetros do modelo hidráulico. Os parâmetros de entrada são:  $\theta_r$  (umidade volumétrica residual);  $\theta_s$  (umidade volumétrica na saturação);  $\alpha$  (parâmetro de ajuste do modelo);  $n$  (parâmetro de ajuste do modelo); e  $K_{sat}$  (coeficiente de permeabilidade hidráulica saturada).

Quando não se possui esses parâmetros, o Hydrus 1-D possui acoplada a função de pedotransferência (FTP) Rosetta (SCHAPP *et al.*, 2001) para a estimativa destes parâmetros. O Rosetta possui algumas opções de dados de entrada:

- a) Classe textural do solo;
- b) Porcentagens das frações minerais do solo: areia, silte e argila;
- c) Porcentagens das frações minerais do solo e a densidade seca ( $\text{g/cm}^3$ );
- d) Porcentagens das frações minerais do solo, densidade seca ( $\text{g/cm}^3$ ) e umidade volumétrica em 330 hPa;
- e) Porcentagens das frações minerais do solo, densidade seca ( $\text{g/cm}^3$ ), umidade volumétrica em 330 hPa, e umidade volumétrica em 15000 hPa (ponto de murchamento permanente do solo).

Para a estimativa dos parâmetros, a densidade seca deve estar entre 0,5 e 2,0  $\text{g/cm}^3$ , em que geralmente substratos possuem densidades menores que o limite mínimo exigido pelo programa Rosetta. Este software foi construído com dados laboratoriais de solo em regiões temperadas.

Quanto maior o número de informações inseridas, mais exata será a estimativa dos parâmetros.

Em seguida, as condições de contorno superior e inferior, e a condição inicial, devem ser especificadas. Os vários modelos de simulação irão depender de acordo com as condições utilizadas.

## 2.3 VEGETAÇÃO

A vegetação do telhado verde pode influenciar o microclima à sua volta por meio do sombreamento e da evapotranspiração. As folhas das plantas interceptam a maior porção da radiação solar incidente no telhado, reduzindo o calor transmitido para as estruturas localizadas abaixo delas. Desta radiação absorvida, a maior porção é transformada em calor latente e a outra porção, apesar de muito pequena, é transformada em energia química através da fotossíntese realizada pelas plantas (ROSSETI *et al.*, 2013). Portanto, a flora propicia proteção da radiação solar incidente nas edificações de zonas urbanizadas, oferecendo sombreamento agradável, e proteção adicional da edificação contra o vento (SPALA *et al.*, 2008). A evapotranspiração converte a água retida no substrato e nas folhas em vapor d'água, deste modo reduzindo a temperatura e aumentando a umidade do ar circundante (ROSSETI *et al.*, 2013). Durante o verão, a temperatura do ar abaixo das plantas do telhado verde é mais baixa que o ar acima delas, reduzindo, desta forma, a temperatura interna da edificação (SPALA *et al.*, 2008; BLANK *et al.*, 2013).

A vegetação é um importante componente de um sistema de telhado verde, a qual aumenta a capacidade do sistema de fornecer benefícios, tais como: retenção de água, biodiversidade, apelo estético e redução do efeito de ilha de calor urbano (GRACESON *et al.*, 2014).

Quando o substrato limita a taxa de crescimento das espécies vegetais que são tolerantes à seca e dos baixos níveis de fertilidade, aumenta-se a capacidade de competição de outras espécies menos tolerantes. Isso pode resultar em maior diversidade de espécies, e aumenta a robustez do sistema de telhado verde em sua capacidade de lidar com condições variáveis ao longo do tempo (GRACESON *et al.*, 2014).

O desenvolvimento de jardins multicoloridos, proporcionados por uma taxa perfeita de plantas herbáceas em relação às plantas perenes, possui benefícios ambientais, por aumentar a biodiversidade, além de benefícios estéticos (SPALA *et al.*, 2008).

A umidade do substrato é essencial para a sobrevivência da vegetação, o que influencia na seleção de espécies de plantas a serem utilizadas em telhados verdes. O maior problema em climas secos é a taxa de perda de água da vegetação

a partir do substrato. Neste contexto, espécies *Sedum* tolerantes à seca (*Crassulaceae*) são as plantas mais indicadas para telhados verdes extensivos (BLANK *et al.*, 2013).

Além da tolerância à seca, a tolerância à radiação solar também deve ser considerada na escolha da vegetação, pois a maior parte dos telhados verdes são expostos a valores altos de radiação solar incidente. Alguns telhados podem ser sombreados por edifícios próximos. Existem plantas que não respondem bem à radiação solar intensa, enquanto outras são capazes de resistir a ela (LI & YEUNG, 2014).

A seleção de plantas a serem utilizadas em telhados verdes depende também do seu período de floração, clima da região, tipo de substrato que estas plantas necessitam, e da altura da vegetação final desejada (SPALA *et al.*, 2008). Em telhados verdes intensivos, as plantas relativamente grandes devem ser podadas adequadamente e com frequência, protegendo-as contra ventos fortes.

O projeto ótimo de sistemas de telhado verde extensivo inclui o cancelamento de irrigação por uma vegetação tolerante à seca. Por outro lado, as espécies mais utilizadas de cultivos necessitam de irrigação. Se necessário, a água da chuva pode ser concentrada por um sistema de drenagem do telhado e utilizada para a irrigação (SPALA *et al.*, 2008).

### 2.3.1 Vegetação para Telhados Verdes

#### **Sedum acre**

*Sedum* são plantas suculentas e consideradas como plantas de metabolismo ácido das crassuláceas (CAM), onde os estômatos abrem-se à noite para permitir que o dióxido de carbono entre, e se fecham durante o dia para evitar a perda de água por evapotranspiração (LI & YEUNG, 2014). Portanto, estas plantas podem sobreviver por longo período sem a necessidade de irrigação.

Espécies *Sedum* são a escolha mais comum e adequada para uso em telhado verde extensivo. São plantas pequenas que crescem em todo o terreno e com raízes pouco profundas, oferecendo boa cobertura e proteção da membrana do

telhado. Estas plantas requerem manutenção mínima e são fáceis de instalar em sistemas de telhado verde (CASTLETON *et al.*, 2010; LI & YEUNG, 2014).

### **Grama amendoim (*Arachis repens*)**

Para a redução eficiente dos fluxos de calor no verão para o interior da edificação são recomendadas plantas com muitas folhas, preferencialmente horizontais. Esta recomendação é suprida pela aplicação da grama-amendoim (*Arachis repens*) (FERRAZ & LEITE, 2011).

A grama amendoim, pertencente à família *Fabaceae*, é uma planta herbácea rasteira, perene e nativa do Brasil, atingindo 10 a 20 cm de altura, com ramagem prostrada e fina (BEATRICE, 2011; FERRAZ & LEITE, 2011).

É uma espécie resistente ao sol e a substratos de moderada fertilidade, tolerante à acidez do substrato (pH em torno de 5) e à alta concentração de alumínio (75%) (BEATRICE, 2011). Seu cultivo ideal é em canteiros a pleno sol, substratos ricos em matéria orgânica, permeáveis e com irrigação periódica (FERRAZ & LEITE, 2011).

Como a grama amendoim é uma planta nativa do Brasil e América Latina, sendo habituada com as variações climáticas do continente, esta espécie possui desenvolvimento rápido, não requer manutenção constante com podas e possui baixo custo (FERRAZ & LEITE, 2011).

Outra característica interessante da grama amendoim é a sobrevivência em substratos bem drenados em condições normais de plantio. Porém, esta espécie também tolera condições de má drenagem e encharcamento temporário (BEATRICE, 2011).

De acordo com Graceson *et al.* (2014), *sedums* são mais tolerantes à seca do que espécies de gramíneas. A remoção de água por meio do substrato é realizada com mais sucesso por espécies de gramíneas; contudo, *sedums* possuem menor taxa de absorção de água. Portanto, gramíneas têm maior dependência hídrica do que *sedums*, e exigem uma fonte de água mais frequente. *Sedums* são espécies vegetais mais propensas a sobreviver do que plantas perenes herbáceas se as plantas forem submetidas a um período de seca de duas semanas. A resposta

da vegetação, no entanto, é dependente do tipo de substrato utilizado no sistema de telhado verde (GRACESON *et al.*, 2014).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Centro de Ensino Aplicado em Ciências Agrárias (CEAA) da Universidade Federal do Paraná, na Fazenda Canguiri, localizado na latitude sul 25°23'11.8" e longitude oeste 49°07'33.9", no município de Pinhais (PR), região metropolitana de Curitiba, onde o clima é classificado segundo Koppen como Cfb, ou seja, clima temperado. Caracterizado por chuvas uniformemente distribuídas, precipitação média anual de 1400 mm, sem estação seca, com verões frescos, temperatura máxima média de 22°C e mínima média de 18°C, estando sujeito a geadas severas.

Foram coletadas 24 amostras de substrato, em março e abril de 2016, em anéis metálicos nos telhados verdes experimentais instalados em suportes de madeira sobre telhas na Fazenda Canguiri do SCA - UFPR (Figuras 6a e 6b). O projeto estrutural dos telhados verdes experimentais, instalados em novembro de 2014, é composto por uma camada de substrato inicial de 10 cm de profundidade, manta geotêxtil, camada de 2 cm de argila expandida, e um plástico impermeabilizante, sendo caracterizado, portanto, por um telhado verde extensivo.

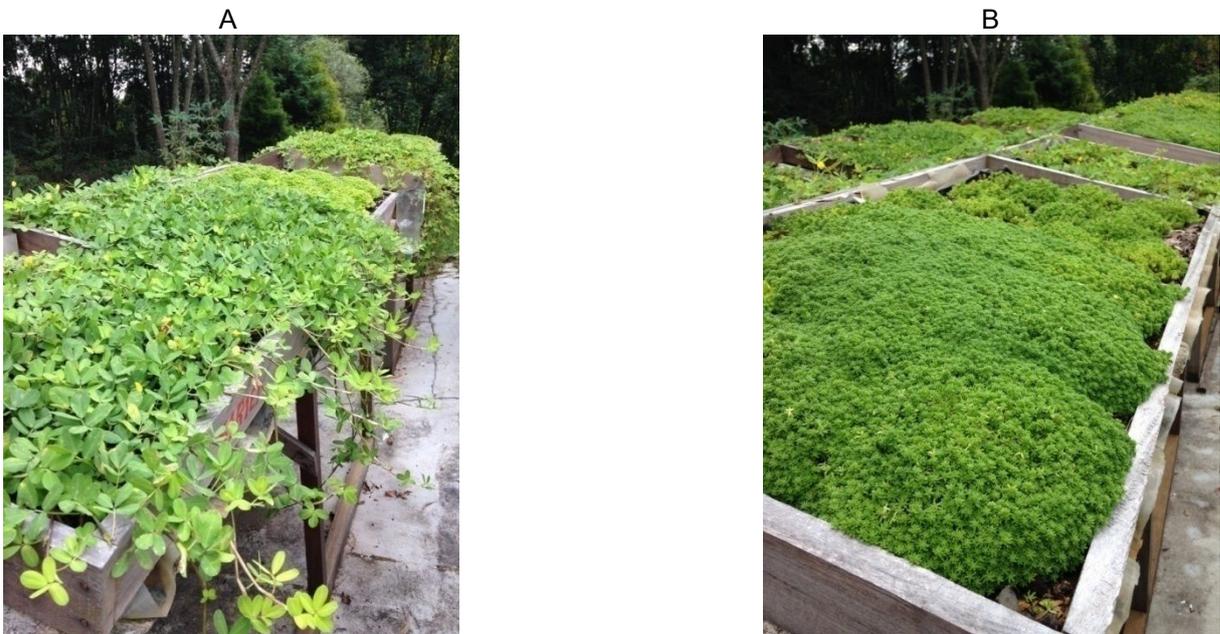


FIGURA 6 - IMAGEM OBTIDA EM MARÇO DE 2015 DOS TELHADOS VERDES EXPERIMENTAIS INSTALADOS NA FAZENDA CANGUIRI DO SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DA UFPR. A) GRAMA AMENDOIM. B) SEDUM ACRE.

Os substratos presentes nos telhados verdes experimentais, com as suas devidas composições, e que foram analisados, são os seguintes:

S1 - Casca de pinus (50%) + casca de arroz carbonizada (CAC) (50%);

S2 - Esterco curtido (50%) + serragem (50%);

S3 - Turfa (50%) + CAC (50%);

S4 - CAC (60%) + argila expandida 0500 (15%) + areia (25%).

As espécies vegetais presentes nos telhados verdes experimentais são as seguintes:

E1 - *Arachis repens* (grama amendoim)

E2 - *Sedum acre*

Os substratos foram avaliados por suas propriedades físicas e químicas antes da instalação dos telhados verdes experimentais pelo Laboratório de Biotecnologia em Horticultura, pertencente ao Departamento de Horticultura e Silvicultura, da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para isso, foram retiradas amostras deformadas.

São quatro composições diferentes de substratos, com duas espécies vegetais distintas, sendo o experimento realizado com seis repetições, perfazendo um total de 48 módulos experimentais. Três repetições foram coletadas de cada substrato com cada vegetação, totalizando 24 amostras.

As análises foram realizadas no Laboratório de Hidráulica para Irrigação (LHI-NAEB) e no Laboratório de Física do Solo (LFS) do Setor de Ciências Agrárias (SCA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Avaliaram-se as propriedades físicas dos substratos: densidade úmida, densidade seca, densidade saturada, densidade das partículas sólidas, umidade atual, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, porosidade total, porosidade de aeração, água facilmente disponível, água tamponante, água remanescente, água disponível, permeabilidade hidráulica saturada, e permeabilidade hidráulica não saturada.

As amostras foram coletadas em anéis metálicos (volumétricos). Como há divergências entre as dimensões e massa de cada anel metálico, foram medidos o diâmetro, altura e massa de cada anel antes das coletas das amostras de substrato. Os anéis metálicos possuem dimensões médias de 4,70 cm de diâmetro e 3,36 cm de altura.

Para a análise da umidade atual, foram coletadas amostras deformadas e embaladas em sacos plásticos, que possuíam fecho, minimizando a perda de umidade da amostra para a atmosfera. As amostras foram levadas para o Laboratório de Física do Solo do SCA da UFPR. Primeiramente, obteve-se a massa úmida dessas amostras, em média 40 g de cada amostra, e posteriormente, essas amostras foram levadas à estufa a  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ , durante 24 horas. Após a retirada das amostras da estufa, obteve-se a massa seca, para a análise da umidade atual, a qual foi obtida de acordo com a Instrução Normativa nº 17 da MAPA (2007), equação (3).

Quando da coleta, as amostras volumétricas foram revestidas com plástico filme, para que a umidade e a estrutura da amostra fossem conservadas. Para análise das densidades úmida e seca, foram utilizados os anéis volumétricos, ou seja, amostras indeformadas. Para isso, a parte inferior dos anéis foi vedada com um tecido de nylon, em que este tecido foi preso por um barbante. As massas dos tecidos e dos barbantes para cada amostra foram obtidas em balança.

A densidade úmida foi calculada de acordo com a equação (5), em que a massa úmida e o volume total são envolvidos. A massa úmida é a massa contida no anel na umidade no momento da coleta. O volume total é o volume interno do anel, calculado de acordo com a equação (15),

$$V_t = \frac{\pi(D_{int})^2}{4}h \quad (15)$$

Em que:

$V_t$ : volume total do anel,  $\text{m}^3$ ;

$D_{int}$ : diâmetro interno do anel, m;

$h$ : altura do anel, m.

A densidade seca foi calculada de acordo com a equação (6). Para a análise da densidade seca da amostra, os anéis metálicos foram levados à estufa para secagem a  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Após essa etapa, a massa seca foi determinada em balança. O volume total é o volume interno do anel.

Como um telhado verde está sendo estudado, foi necessário avaliar se a densidade do substrato quando saturado é muito alta, o que influenciaria na carga total sobre o telhado em caso de saturação do meio poroso. Portanto, a densidade saturada também foi avaliada.

Para a avaliação da densidade das partículas sólidas, amostras deformadas foram secas em estufa a  $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$  durante 24 horas, o que fez com que toda a água contida no substrato fosse substituída por ar. Após retirar as amostras deformadas da estufa, elas foram "moídas" com ajuda de um recipiente de cerâmica, com uma "espátula" de madeira que possui cerâmica em sua extremidade, a fim de deixar o substrato uniforme, pois quando retira-se a amostra da estufa, formam-se agregados. Após esta etapa, passou-se o substrato por uma peneira para retirar partículas de tamanhos elevados. Por possuírem partículas de tamanhos grandes (casca de pinus e argila expandida), utilizou-se uma peneira de 4,0 mm, a fim de caracterizá-los melhor. Estas etapas estão ilustradas na Figura 7, em que o substrato era o S1 (CAC e casca de pinus).



FIGURA 7 - ETAPAS PARA PREPARO DE SUBSTRATO PARA DENSIDADE DE PARTÍCULAS E ANÁLISE TEXTURAL. a) moagem do substrato retirado da estufa. b) passagem por peneira de 4,0 mm. c) substrato pronto para as análises vigentes.

Em seguida, foram colocadas cerca de 17 g em média de cada amostra seca em balões volumétricos de 50 mL. Os balões foram pesados em balança, vazios e com substrato, obtendo-se a massa de cada um deles. O balão volumétrico então foi completado com álcool, para que todo o espaço poroso estivesse preenchido pelo álcool, sem ter ar nos espaços vazios, como mostrado na Figura 8. Como se deseja preencher todo o espaço poroso, utiliza-se álcool devido a sua baixa viscosidade e tensão superficial, e assim facilitando a sua penetração nos espaços vazios (PREVEDELLO & ARMINDO, 2015).



FIGURA 8 - BALÕES VOLUMÉTRICOS DE 50 mL PREENCHIDOS POR SUBSTRATO E ÁLCOOL

Depois de todos os espaços vazios serem preenchidos por álcool, que foi observado pelo término das bolhas de ar dentro do balão volumétrico, pesou-se o balão em balança, e obteve-se a massa de álcool. Com a densidade do álcool, foi possível determinar o volume de álcool dentro do balão volumétrico. Com isso, obteve-se o volume de sólidos da amostra, e calculou-se a densidade de partículas sólidas de acordo com a equação (7). Como esses substratos são meios muito porosos, a obtenção da densidade das partículas sólidas foi alcançada somente após algumas semanas, exceto pelo substrato S4, mesmo com agitação (leve) diária do balão volumétrico.

Após obtidas as densidades das partículas sólidas, com a utilização da lei de Stokes, citada por Prevedello e Armindo (2015), foi possível calcular os tempos de decantação das partículas, para a análise textural, de acordo com

$$t = \frac{18 \cdot h \cdot \eta}{d^2 g (\rho_p - \rho_f)} \quad (16)$$

Em que:

t: tempo de sedimentação da partícula, s;

h: altura, m;

$\eta$ : viscosidade dinâmica do fluido, kg/sm;

d: diâmetro da partícula, m;

g: aceleração da gravidade, m/s<sup>2</sup>;

$\rho_p$ : densidade das partículas sólidas, kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_f$ : densidade do fluido, kg/m<sup>3</sup>.

Considerou-se a altura igual a 100 mm a partir da superfície,  $\eta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg / (sm)}$ ,  $\rho_f \approx 1000 \text{ kg / m}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m / s}^2$ .

Na equação (16), o diâmetro da partícula foi variado, para se conhecer o tempo de decantação da partícula da areia (d=0,2 mm) e de silte (d=0,05 mm), de acordo com a escala de tamanho da USDA. Como a densidade das partículas sólidas da maioria dos substratos é baixa, o tempo de decantação para a partícula de silte foi extremamente alto, chegando a 17 horas.

Com os tempos calculados, as amostras deformadas foram secas em estufa, como o procedimento descrito para a densidade das partículas sólidas. Então foram colocados cerca de 40 g de cada amostra em recipientes de vidro com uma solução com agente dispersante, em que os recipientes foram colocados para agitação mecânica por 16 horas. Após a agitação, a solução foi inserida em provetas de 1000 mL, completando-se o restante com água (Figura 9). Em seguida, agitou-se manualmente a solução na proveta para homogeneizá-la, e iniciou-se a contagem do tempo de decantação. As partículas que iniciaram a sedimentação foram as partículas de maior diâmetro (areia), seguidas de silte e então argila. Após a primeira contagem, de partículas do tamanho da areia, inseriu-se um densímetro na proveta para a leitura da concentração (g/L). Na segunda contagem, partículas do tamanho de silte, o densímetro também foi inserido na proveta a fim de ver sua concentração. Com as concentrações de areia e silte, foi possível obter as frações minerais do solo (areia, silte e argila), para parâmetros de entrada na FTP Rosetta.



FIGURA 9 - SUSPENSÃO AQUOSA DOS SUBSTRATOS EM PROVETAS DE 1000 mL PARA ANÁLISE TEXTURAL PELO MÉTODO DO DENSÍMETRO

Para a análise da permeabilidade hidráulica do substrato saturado, utilizou-se de um permeômetro de carga constante, equipamento existente no Laboratório de Hidráulica para Irrigação (LHI-NAEB) (Figura 10).

Esta propriedade hidráulica foi obtida antes da determinação da curva de retenção. Para a utilização do equipamento, foi colocado outro anel volumétrico em cima do anel volumétrico contendo a amostra (vedado com veda rosca e *silvertape*), para que tivesse uma carga hidráulica em cima da amostra. Então saturou-se as amostras durante dois dias, pois os substratos analisados saturam-se rapidamente.

Deste modo, a amostra foi retirada da saturação e colocada no equipamento, como na Figura 10. A altura da carga hidráulica aplicada é a altura do anel superior (sem amostra). A passagem de água foi realizada, em média, por 15 segundos, em que se obteve a massa de água em um recipiente em balança. Com a densidade da água igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ , foi possível estimar o volume  $V$  que passou por uma área transversal  $A$ , em um tempo  $t$ . Assim, calculou-se a densidade de fluxo  $q$ , em  $\text{m/s}$ . Por último, com o gradiente hidráulico, calculou-se a permeabilidade hidráulica do substrato saturado de acordo com a equação (12).



FIGURA 10 - PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE DO LHI-NEAB UTILIZADO PARA A ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DO SUBSTRATO SATURADO

Com o resultado do coeficiente de permeabilidade hidráulica do substrato saturado, foi possível estimar a permeabilidade hidráulica em diferentes umidades, de acordo com a equação (13).

A umidade na saturação ( $\theta_s$ ), o espaço de aeração (EA), a água facilmente disponível (AFD), a água tamponante (AT), a água disponível (AD) e a capacidade de retenção de água (CRA) foram determinadas a partir da determinação das curvas de retenção de água dos substratos. Para a sua determinação, o funil de Haines, como descrito por Cássaro *et al.* (2008), foi utilizado nas tensões de 0, 10, 50 e 100hPa.

Pelo método de funil de tensão de Haines, os anéis metálicos foram colocados individualmente para drenar dentro do funil de tensão com placa porosa, como esquematizado na Figura 11. A tensão foi determinada pela altura da coluna de água do tubo flexível de 10, 50 e 100 cm.

A fim de se evitar a evaporação de água pela superfície das amostras, o funil foi coberto com uma manta geotêxtil durante a determinação de toda uma curva de retenção.



FIGURA 11 - EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA A OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA (FUNIL DE HAINES).

Para a determinação da umidade em 10 hPa, 50 hPa e 100 hPa, foram necessárias em média, respectivamente, 4 horas, 11 horas e 18 horas para atingir o equilíbrio, em que a drenagem de água cessou.

A umidade volumétrica  $\theta_i$  para cada tensão  $h_i$  foi obtida de acordo com a seguinte equação, em que a densidade da água foi considerada igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,

$$\theta_i = \frac{(m_i - m_s) / \rho_{H_2O}}{V_t} \quad (17)$$

Em que:

$\theta_i$ : umidade volumétrica na tensão  $i$ ,  $m^3/m^3$ ;

$m_i$ : massa da amostra após aplicação da tensão  $i$ , kg;

$m_s$ : massa da amostra seca, kg;

$\rho_{H_2O}$ : densidade da água,  $kg/m^3$ ;

$V_t$ : volume interno do anel,  $m^3$ .

A construção das curvas de retenção de água foi efetuada com os valores de umidade volumétrica obtidos com as umidades retidas para cada tensão.

Com a determinação da curva de retenção de água, foi possível obter as seguintes propriedades: Porosidade total (PT), correspondente à umidade volumétrica presente nas amostras saturadas (0 hPa); Espaço de Aeração (EA), diferença obtida entre a saturação e a umidade volumétrica na tensão de 10 cm de coluna d'água (10 hPa); Água Facilmente Disponível (AFD), volume de água encontrado entre os pontos 10 e 50 cm de coluna d'água (10 e 50 hPa); Água Tamponante (AT), água volumétrica liberada entre 50 e 100 cm de d'água (50 e 100 hPa); Água Disponível (AD), volume de água liberado entre 10 e 100 cm de d'água (10 e 100 hPa) e, Água Remanescente 100 cm ( $AR_{100}$ ), volume de água que permaneceu na amostra após ser submetida a pressão de sucção de 100 hPa. Essas propriedades foram calculadas de acordo com as equações (17-22).

$$EA = \frac{(m_{sat} - m_{10cm}) / \rho_{H_2O}}{V_t} \quad (18)$$

Em que:

EA: fração do espaço de aeração,  $m^3/m^3$ ;

$m_{sat}$ : massa da amostra saturada, kg;

$m_{10cm}$ : massa da amostra após aplicação de 10hPa, kg;

$\rho_{H_2O}$ : densidade da água,  $kg/m^3$ ;

$V_t$ : volume interno do anel,  $m^3$ .

$$AFD = \frac{(m_{10cm} - m_{50cm}) / \rho_{H_2O}}{V_t} \quad (19)$$

Em que:

AFD: fração de água facilmente disponível, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  
 m<sub>10cm</sub>: massa da amostra após aplicação de 10hPa, kg;  
 m<sub>50cm</sub>: massa da amostra após aplicação de 50hPa, kg;  
 ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: densidade da água, kg/m<sup>3</sup>;  
 V<sub>t</sub>: volume interno do anel, m<sup>3</sup>.

$$AT = \frac{(m_{50cm} - m_{100cm}) / \rho_{H_2O}}{V_t} \quad (20)$$

Em que:

AT: fração de água tamponante, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  
 m<sub>50cm</sub>: massa da amostra após aplicação de 50hPa, kg;  
 m<sub>100cm</sub>: massa da amostra após aplicação de 100hPa, kg;  
 ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: densidade da água, kg/m<sup>3</sup>;  
 V<sub>t</sub>: volume interno do anel, m<sup>3</sup>.

$$AD = \frac{(m_{10cm} - m_{100cm}) / \rho_{H_2O}}{V_t} \quad (21)$$

Em que:

AD: fração de água disponível (AFD + AT), m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  
 m<sub>10cm</sub>: massa da amostra após aplicação de 10hPa, kg;  
 m<sub>100cm</sub>: massa da amostra após aplicação de 100hPa, kg;  
 ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: densidade da água, kg/m<sup>3</sup>;  
 V<sub>t</sub>: volume interno do anel, m<sup>3</sup>.

$$AR_{100} = \frac{(m_{100cm} - m_s) / \rho_{H_2O}}{V_t} \quad (22)$$

Em que:

AR<sub>100</sub>: fração de água remanescente após aplicação de 100hPa, m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>;  
 m<sub>100cm</sub>: massa da amostra após aplicação de 100hPa, kg;  
 m<sub>s</sub>: massa da amostra seca, kg;  
 ρ<sub>H<sub>2</sub>O</sub>: densidade da água, kg/m<sup>3</sup>;  
 V<sub>t</sub>: volume interno do anel, m<sup>3</sup>.

A versão do Hydrus referida no presente estudo é Hydrus 1-D, versão 4.16.0110. Utilizando a equação de Richards para equações variavelmente-saturadas e de convecção-dispersão, Hydrus 1-D resolve numericamente o transporte de calor e de umidade para um determinado solo (ŠIMŮNEK *et al.*, 2009).

Foi simulado o processo de fluxo de água (*water flow*) no software Hydrus 1-D, a fim de simular o transporte de água nos substratos. Quando esta opção foi selecionada, o programa automaticamente considerou fluxo transiente.

Nas informações da geometria do meio poroso, a unidade de comprimento utilizada foi em (cm) para ser usada em toda a simulação. Para cada simulação, foi utilizado somente um material. A profundidade do perfil do meio poroso utilizada foi de 7,5 cm, sendo a média do perfil do substrato entre novembro de 2014 (10 cm), e abril de 2016 (5 cm). Avaliou-se somente uma camada (subregião), em que o substrato possui perfil vertical e, portanto, foi empregado o valor 1 para a declinação a partir da vertical.

Foram avaliados 18 meses, em que o tempo inicial foi dia 0 (novembro de 2014) e o tempo final dia 18 (abril de 2016). O incremento de tempo inicial  $dt$  utilizado foi de 0,01 dia. O valor mínimo de incremento de tempo permitido utilizado,  $dt_{min}$ , foi 0,00001 dia. O valor máximo do incremento de tempo utilizado,  $dt_{max}$ , foi 0,005 dia.

Para a estimativa do potencial de escoamento superficial pelos substratos analisados, foi utilizada a condição de contorno superior atmosférica com escoamento superficial (*run-off*).

No telhado verde experimental, abaixo da camada de substrato, há uma manta geotêxtil (camada filtrante), seguido de uma camada drenante de argila expandida (partículas grandes), seguido de um plástico impermeabilizante, e então as telhas de fibrocimento. Uma parte da água que infiltra no substrato é retida, e uma parte é drenada pelas ondulações da telha. Deste modo, a condição de contorno inferior foi de livre drenagem. A condição inicial foi em termos de conteúdo de água.

Foram obtidos dados de precipitação e de temperaturas máxima e mínima médias para os 18 meses avaliados por meio do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Os valores de precipitação foram então inseridos no Hydrus como condição de contorno superior dependente do tempo. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo Hydrus pelo método de Hargreaves e Samani (1976), em que somente as informações de temperaturas máxima e mínima foram necessárias para a estimativa pelo programa.

Para a validação da FTP Rosetta (Rosetta Lite v. 1.1, acoplada ao Hydrus 1-D) em substratos, foram colocados como parâmetros de entrada as frações minerais

do solo (areia, silte e argila), obtidas pela análise textural, e a densidade seca do substrato. Os parâmetros de saída  $\theta_s$  (umidade volumétrica na saturação),  $\theta_r$  (umidade volumétrica residual),  $\alpha$  (parâmetro de ajuste do modelo de van Genuchten),  $n$  (parâmetro de ajuste do modelo) e  $K_{sat}$  (coeficiente de permeabilidade hidráulica do substrato saturado) foram então comparados com os valores observados, obtidos pelo método dos mínimos quadrados.

Para a validação da função de pedotransferência Rosetta, foram utilizados o RMSE (Equação 23) e o  $R^2$  (Equação 24),

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (23)$$

Em que:

RMSE: *root mean square error*;

N: número de observações;

$O_i$ : valor observado;

$S_i$ : valor estimado.

O RMSE, raiz quadrada do erro médio quadrático, possui valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a exatidão dos valores medidos ou estimados.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (24)$$

Em que:

$R^2$ : coeficiente de determinação;

N: número de observações;

$\hat{y}_i$ : valor estimado;

$\bar{y}$ : média das observações;

$y_i$ : valor observado.

O coeficiente de determinação, também chamado de  $R^2$ , é uma medida de ajustamento da regressão linear em relação aos valores observados. O  $R^2$  varia entre 0 e 1, indicando o quanto o modelo consegue se correlacionar com os valores observados. Quanto maior o valor de  $R^2$ , maior a precisão do modelo para se ajustar aos valores observados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 GRANULOMETRIA

A maioria dos substratos utilizados neste estudo possuem em sua composição somente matéria orgânica e vegetal, exceto o substrato S4. Porém, para utilizar a função de pedotransferência Rosetta, acoplada ao Hydrus, foi necessário fazer a análise textural dos substratos referente aos tamanhos de classificação da fração mineral do solo. Com a análise textural, pôde-se avaliar a granulometria do substrato, ou seja, o tamanho de suas partículas. De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), citado por Prevedello e Armindo (2015), a areia possui dimensões de 0,05 a 2 mm, silte está compreendido entre 0,05 e 0,002 mm, e a argila possui tamanho menor que 0,002 mm. Os resultados das análises texturais estão na Tabela 2, em que os tamanhos das partículas dos substratos analisados são referentes aos tamanhos de classificação da fração mineral do solo.

TABELA 2 - GRANULOMETRIA DOS SUBSTRATOS ANALISADOS REFERENTE À CLASSIFICAÇÃO DA FRAÇÃO MINERAL DO SOLO

	Tamanho das partículas do substrato		
	0,05 - 4 mm (%)	0,002 - 0,05 mm (%)	< 0,002 mm (%)
S1E1	48,79	36,38	14,83
S1E2	49,06	25,68	25,26
S2E1	56,79	26,25	16,96
S2E2	60,28	19,53	20,19
S3E1	59,16	29,68	11,16
S3E2	53,75	32,39	13,86
S4E1	76,38	12,86	10,76
S4E2	77,99	9,55	12,46

O substrato S1 (50% casca de pinus e 50% CAC) é caracterizado por cerca de metade das partículas maiores que 0,05 mm. O S1E1 possui maior espaço poroso, devido ao menor tamanho de partículas, e assim, possui uma maior capacidade de retenção de água.

O substrato S2, composto por de metade de esterco curtido, e metade serragem, é constituído de 60% de partículas maiores que 0,05 mm. Em relação à

vegetação, o substrato S2E1 possui maior capacidade de retenção de água devido ao seu menor tamanho de partícula, portanto, possui maior número de microporos.

O substrato S3 (50% turfa e 50% CAC), possui 56,5% de suas partículas de maior diâmetro. Em consequência de seu menor tamanho de partícula, o substrato S3E2 possui maior número de microporos, os quais são responsáveis pela retenção de água, e assim possui maior capacidade de retenção quando comparado ao S3E1.

O substrato S4, constituído por 60% de CAC, 15% de argila expandida e 25% areia é caracterizado por 77% de partículas maiores que 0,05 mm. O substrato S4E1 possui tamanho de partícula menor que o S4E2, e consequentemente maior retenção de água.

Deste modo, os substratos analisados possuem em sua maioria partículas maiores que 0,05 mm, em que substrato S4 possui elevada quantidade destas partículas.

Em relação a todos os substratos, o substrato S4 possui a menor capacidade de retenção de água, devido ao grande tamanho de suas partículas. Já o substrato S1 possui a maior capacidade de retenção de água.

## 4.2 UMIDADES

Em relação às umidades, para as amostras deformadas, avaliou-se a umidade atual. Para as amostras indeformadas, foram avaliadas as umidades gravimétrica e volumétrica. Os resultados dessas umidades constam na Tabela 3, em que seus valores são referentes às umidades nas amostras no momento da coleta.

TABELA 3 - UMIDADES INICIAIS DOS SUBSTRATOS AVALIADOS

	Umidade atual (kg/kg)	Umidade gravimétrica (kg/kg)	Umidade volumétrica (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
S1E1	0,6295	0,5498	0,3629
S1E2	0,6256	0,5366	0,4372
S2E1	0,7164	0,5207	0,3600
S2E2	0,6202	0,4946	0,3178
S3E1	0,7275	0,7275	0,5047
S3E2	0,7232	0,6772	0,5183
S4E1	0,3145	0,2743	0,3209
S4E2	0,3346	0,2874	0,3290

A umidade atual se refere ao momento atual da coleta, em que coletaram-se amostras em profundidades diferentes daquelas com os anéis volumétricos. Além disso, as coletas foram realizadas em momentos distintos e, portanto, a diferença entre as umidades atual e gravimétrica obtidas foi devido a variabilidade temporal, além da variabilidade espacial.

O substrato S3 teve as maiores umidades atual, gravimétrica e volumétrica. Portanto, é o substrato que possuiu maior capacidade de retenção de umidade. Já o substrato S4 teve as menores umidades, e portanto, também comprovado por meio de seus tamanhos de partículas, é o substrato que apresentou menor capacidade de retenção de umidade.

#### 4.3 DENSIDADES

Para avaliar os níveis de carga do substrato sobre o telhado, foi necessário conhecer as suas densidades em diferentes umidades. Analisaram-se as densidades seca, atual, saturada, e das partículas sólidas. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.

TABELA 4 - DENSIDADES DOS SUBSTRATOS AVALIADOS

	Densidade seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade atual (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade saturada (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade das partículas (kg/m <sup>3</sup> )
S1E1	299	666	1086	2049
S1E2	389	837	1133	2041
S2E1	329	697	1143	1776
S2E2	382	695	1140	1921
S3E1	184	697	1121	1782
S3E2	249	765	1172	1739
S4E1	853	1173	1495	2453
S4E2	854	1187	1494	2298

Os valores de referência de densidade para um substrato seco estão entre 400 e 500 kg/m<sup>3</sup>. Nenhum dos substratos avaliados possuem densidade seca nesta faixa, contudo, os substratos S1E2 e S2E2 encontram-se próximos ao valor de referência. Com os resultados de densidade do substrato seco, pode-se perceber que o substrato S4 apresentou a maior densidade seca, pois é constituído também de areia, o que aumentou a densidade do substrato.

Para a densidade das partículas sólidas, o valor de referência é de 1450 kg/m<sup>3</sup> para partículas orgânicas e 2650 kg/m<sup>3</sup> para partículas minerais. Os substratos analisados encontram-se nesta faixa.

Em relação à densidade de saturação, o maior valor obtido foi do substrato S4, com valores equivalentes entre as vegetações. Apesar de ser a maior entre as três, a densidade saturada dos substratos não apresentou elevado valor, não implicando, desse modo, em elevada carga sobre o telhado.

#### 4.4 AVALIAÇÃO TEMPORAL DAS PROPRIEDADES FÍSICO-HIDRÁULICAS

As umidades atuais e densidades seca e úmida dos substratos também foram analisadas em novembro de 2014, em que o telhado verde experimental ainda não havia sido implementado. A comparação dos valores obtidos em novembro de 2014 e abril de 2016 encontram-se na Tabela 5.

TABELA 5 - DENSIDADES SECA E ÚMIDA, E UMIDADE ATUAL EM NOVEMBRO DE 2014 E ABRIL DE 2016

	Densidade seca (kg/m <sup>3</sup> )		Densidade úmida (kg/m <sup>3</sup> )		Umidade Atual (%)	
	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16
S1	219	344	276	751	20,61	62,76
S2	240	355	294	696	18,46	66,83
S3	175	216	231	731	24,00	72,53
S4	342	853	353	1180	3,32	32,46

Em 18 meses, a densidade seca de todos os substratos aumentou, o que mostra o aumento do adensamento do substrato ao longo do tempo, provavelmente pelo papel das raízes das vegetações.

A casca de arroz carbonizada (CAC) deveria ser resistente à decomposição, porém como pode-se observar, a densidade seca do substrato S4 aumentou consideravelmente. Portanto, a CAC teve alguma decomposição, e com isso a densidade seca aumentou devido à maior quantidade de argila expandida, e principalmente de areia, a qual possui alta densidade.

Os resultados da curva de retenção da água, com as suas umidades volumétricas nas tensões de 0, 10, 50 e 100 hPa para novembro de 2014 e analisados em abril de 2016 encontram-se na tabela a seguir.

TABELA 6 - UMIDADES VOLUMÉTRICAS NAS TENSÕES 0, 10, 50 E 100 hPa EM NOVEMBRO DE 2014 E ABRIL DE 2016.

	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		$\theta_{10}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		$\theta_{50}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		$\theta_{100}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	
	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16
S1	0,8327	0,7656	0,5784	0,7045	0,1801	0,4436	0,1442	0,3312
S2	0,9439	0,7861	0,8217	0,7314	0,4153	0,4179	0,3952	0,3020
S3	0,8677	0,9304	0,7181	0,8866	0,2591	0,5490	0,1969	0,3698
S4	0,9025	0,6400	0,8417	0,6033	0,2010	0,3617	0,1127	0,2225

$\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação (0 hPa);  $\theta_{10}$ : umidade volumétrica na amostra após aplicada uma tensão de 10 hPa;  $\theta_{50}$ : umidade volumétrica na amostra após aplicada uma tensão de 50 hPa;  $\theta_{100}$ : umidade volumétrica na amostra após aplicada uma tensão de 100 hPa.

A umidade volumétrica na saturação, que é a porosidade total em material poroso não expansível, ou seja, na tensão 0hPa, aumentou somente para o substrato S3. Os valores de referência para a umidade na saturação situam-se entre 80 e 90%, segundo Bosa *et al.* (2003) e Souza *et al.* (2006), ou maior que 85% (De Boodt & Verdonck, 1972). Deste modo, o valor da umidade na saturação obtido para o substrato S4 encontra-se fora da faixa ideal.

A capacidade de retenção a baixas tensões aumentou nos substratos S1 e S3, e diminuiu nos substratos S2 e S4. A capacidade de retenção de água na tensão de

50hPa aumentou significativamente, mais que o dobro, para os substratos S1 e S3. Já a capacidade de retenção de água em altas tensões diminuiu somente para o substrato S2. Portanto, a altas tensões, o substrato S4 possui a menor disponibilidade hídrica para a vegetação.

Os resultados de espaço de aeração, água facilmente disponível, água tamponante, água remanescente e água disponível dos substratos em novembro de 2014 e analisados em abril de 2016 encontram-se na tabela a seguir.

TABELA 7 - PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SUBSTRATOS

	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16	nov/14	abr/16
	EA (%)		AFD (%)		AT (%)		AR <sub>100</sub> (%)		AD (%)	
S1	25,43	6,11	39,38	26,09	3,59	11,24	14,42	33,12	42,97	37,33
S2	12,22	5,48	40,64	31,35	2,01	11,59	39,52	30,20	42,65	42,94
S3	14,96	4,38	45,90	33,76	6,22	17,93	19,69	36,98	52,12	51,68
S4	6,08	3,67	64,08	24,16	8,82	13,92	11,27	22,25	72,90	38,08

EA: espaço de aeração; AFD: água facilmente disponível; AT: água tamponante; AR<sub>100</sub>: água remanescente em 100 hPa; AD: água disponível.

O espaço de aeração de todos os substratos foi significativamente reduzido, em que seus valores devem estar entre 10 e 40%, o que não foi obtido para nenhum dos substratos analisados.

A água facilmente disponível também foi reduzida, principalmente pelo substrato S4. Valores de referência para a água facilmente disponível situam-se entre 20 a 30%, que foram obtidos pelos substratos S1 e S4. Os substratos S2 e S3 apresentaram valores de AFD um pouco acima dos valores de referência, mas não foram valores muito fora do padrão.

A água tamponante aumentou para todos os substratos. Isso significa que em tensões médias, aumentou-se a capacidade do substrato reter água. A água tamponante deve ser de 4 a 10%, portanto, os valores obtidos estão acima dos valores de referência.

Os valores de água remanescente devem estar situados na faixa de 20 a 30%. Foram obtidos valores nesta faixa somente para os substratos S2 e S4. Em sua maioria, aumentaram-se a AR dos substratos analisados, exceto para o substrato S2.

Em relação à água disponível, esta foi reduzida para o substrato S4. Para os outros substratos analisados, a AD manteve-se relativamente constante. Para um substrato de boa qualidade, deve haver 24 a 40% de água disponível. Isso foi obtido

para a maioria dos substratos analisados, em que somente o substrato S3 apresentou um valor muito superior aos outros.

Para as curvas de retenção de água dos dados observados, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para a estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980). Esses resultados encontram-se nas Tabelas 8 (novembro de 2014) e 9 (abril de 2016).

TABELA 8 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SUBSTRATO REFERENTES À NOVEMBRO DE 2014

	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (hPa <sup>-1</sup> )	n	m	RMSE	R <sup>2</sup>
S1	0,8327	0,1255	0,1030	2,5570	0,6089	0,0000	1,0000
S2	0,9439	0,3899	0,0774	3,2727	0,6944	0,0000	1,0000
S3	0,8677	0,1610	0,0750	2,4776	0,5964	0,0000	1,0000
S4	0,9025	0,0837	0,0503	3,0667	0,6739	0,0000	1,0000

$\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação;  $\theta_r$ : umidade volumétrica residual;  $\alpha$ , n, m: parâmetros de ajuste do modelo; RMSE: *root mean square error*; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação.

TABELA 9 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SUBSTRATO REFERENTES À ABRIL DE 2016

	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (hPa <sup>-1</sup> )	n	m	RMSE	R <sup>2</sup>
S1	0,7656	0,1305	0,0470	1,7260	0,4206	0,0000	1,0000
S2	0,7861	0,1708	0,0453	2,0076	0,5019	0,0000	1,0000
S3	0,9304	0,1193	0,0337	1,9319	0,4824	0,0000	1,0000
S4	0,6400	0,0864	0,0339	2,0845	0,5203	0,0060	0,9990

$\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação;  $\theta_r$ : umidade volumétrica residual;  $\alpha$ , n, m: parâmetros de ajuste do modelo; RMSE: *root mean square error*; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação.

Com as umidades volumétricas saturada e residual, e os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980), foi possível obter as curvas de retenção da água dos substratos analisados referentes a novembro de 2014 e abril de 2016, que encontram-se no Gráfico 1 a seguir.

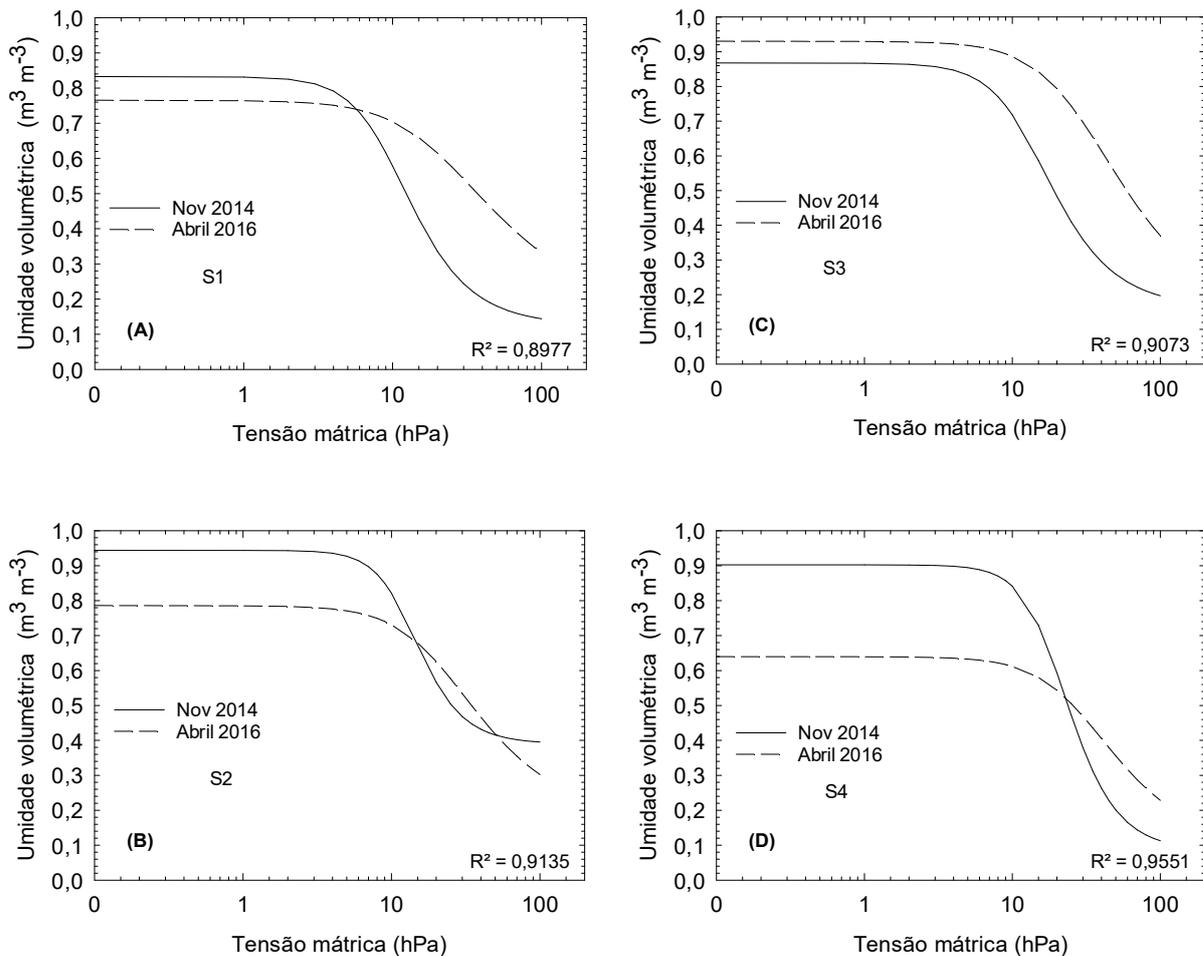


GRÁFICO 12 - AVALIAÇÃO TEMPORAL DOS SUBSTRATOS DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016. A) SUBSTRATO 1. B) SUBSTRATO 2. C) SUBSTRATO 3. D) SUBSTRATO 4.

Para o substrato S1, a umidade na saturação foi reduzida, contudo aumentou-se a capacidade de retenção em médias e altas tensões. Para o substrato S2, a umidade na saturação e em altas tensões foi reduzida, no entanto, a umidade decaiu mais lentamente com a tensão, quando comparado a novembro de 2014. No substrato S3, em todas as tensões avaliadas, a capacidade de reter água foi aumentada. Mesmo com o aumento da densidade seca deste substrato, a sua umidade na saturação aumentou. Para o substrato S4, foi observada alta redução na umidade de saturação, porém, a tensões médias e altas, foram liberadas menores quantidades de água. Portanto, para todos os substratos avaliados, a umidade decaiu mais lentamente com o aumento da tensão.

As capacidades de retenção de água dos substratos com suas vegetações analisados em abril de 2016 encontram-se na Tabela 10.

TABELA 10 - PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DOS SUBSTRATOS COM SUAS VEGETAÇÕES AVALIADAS EM ABRIL DE 2016

	PT (%)	EA (%)	AFD (%)	AT (%)	AD (%)	AR <sub>100</sub> (%)
S1E1	78,71	5,21	26,17	12,93	39,10	34,40
S1E2	74,71	7,01	26,02	9,54	35,56	31,85
S2E1	81,43	5,02	33,16	13,28	46,44	29,97
S2E2	75,80	5,93	29,54	9,90	39,44	30,43
S3E1	93,73	4,71	34,42	16,68	51,10	37,92
S3E2	92,35	4,05	33,09	19,17	52,26	36,04
S4E1	64,04	3,20	23,57	16,80	40,37	20,47
S4E2	63,97	4,15	24,74	11,04	35,78	24,04

Em relação à porosidade total, somente o substrato S2 com a vegetação E1 encontra-se na faixa ideal (80 a 90%). Para todos substratos analisados, os valores de espaço de aeração situam-se fora dos valores de referência, sendo que o substrato S1E2 teve o maior valor de EA, com 7%, e assim, possui maior oxigenação para as raízes das plantas. Já para a água facilmente disponível, os substratos encontram-se na faixa de referência (20 a 30%), exceto os substratos S2E1, S3E1 e S3E2. Quanto à água tamponante, somente os substratos S1E2 e S2E2 apresentam-se na faixa ideal (4 a 10%). Todos substratos avaliados possuem água disponível acima do limite mínimo de 24%, em que o máximo é de 40%. Em relação à água remanescente, somente os substratos S2E1, S4E1 e S4E2 encontram-se na faixa ideal (20 a 30%).

Os substratos S3E1 e S3E2 apresentaram valores de PT, AFD, AT, AD, e AR acima dos limites máximos de referência, e quanto ao EA, apresentaram valores abaixo do mínimo necessário.

Em relação a todos os parâmetros de capacidade de retenção de água, o substrato S1E2 mostrou os melhores resultados, principalmente pelo maior valor de espaço de aeração observado.

Para avaliar os efeitos que as vegetações tiveram sobre os substratos analisados, foram obtidas as curvas de retenção de água com o substrato analisado em novembro de 2014 (sem instalação do telhado verde experimental, e portanto, sem vegetação), e os substratos com cada vegetação analisados em abril de 2016. Essas curvas de retenção estão relacionadas no Gráfico 2.

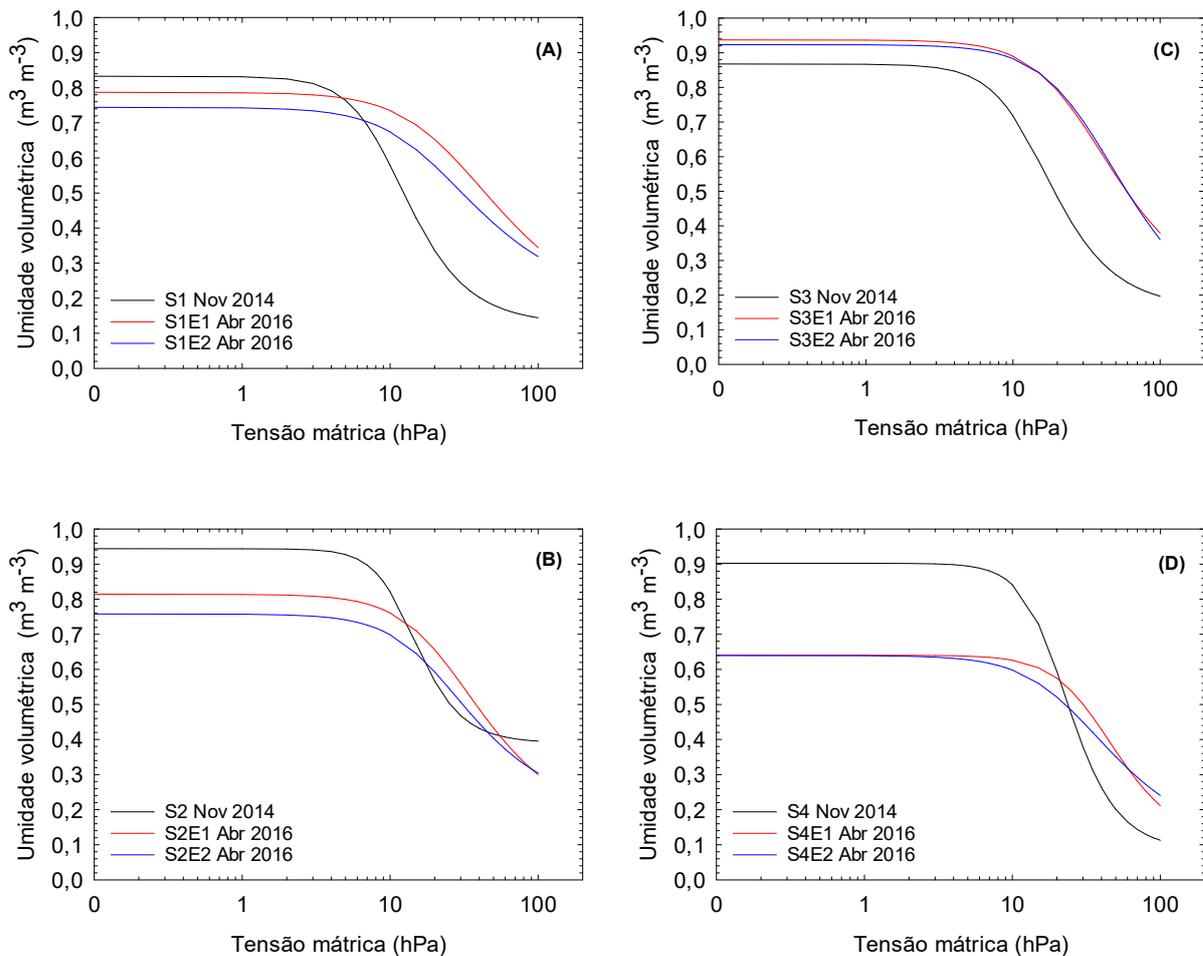


GRÁFICO 13 - AVALIAÇÃO TEMPORAL DOS SUBSTRATOS DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 DE ACORDO COM A VEGETAÇÃO. A) SUBSTRATO 1 COM VEGETAÇÕES 1 E 2. B) SUBSTRATO 2 COM VEGETAÇÕES 1 E 2. C) SUBSTRATO 3 COM VEGETAÇÕES 1 E 2. D) SUBSTRATO 4 COM VEGETAÇÕES 1 E 2.

Para o substrato S1, a vegetação E1 aumentou a capacidade de reter água em baixas, médias e altas tensões. Portanto, há maior disponibilidade hídrica para essa vegetação. A vegetação E1 do substrato S2, aumentou a umidade em baixas e médias tensões, em que para altas tensões, as suas curvas se assemelham. Para o substrato S3, as vegetações *Arachis repens* e *Sedum acre* aumentaram a sua umidade na saturação, e igualmente fizeram com que a umidade presente no substrato decaísse mais lentamente com o aumento da tensão. Com a vegetação E1 do substrato S4, observou-se maiores umidades a médias tensões, e à altas tensões, maior disponibilidade hídrica, quando comparada à vegetação E2.

Para avaliação do comportamento de todos os substratos, obteve-se a curva de retenção do Gráfico 3.

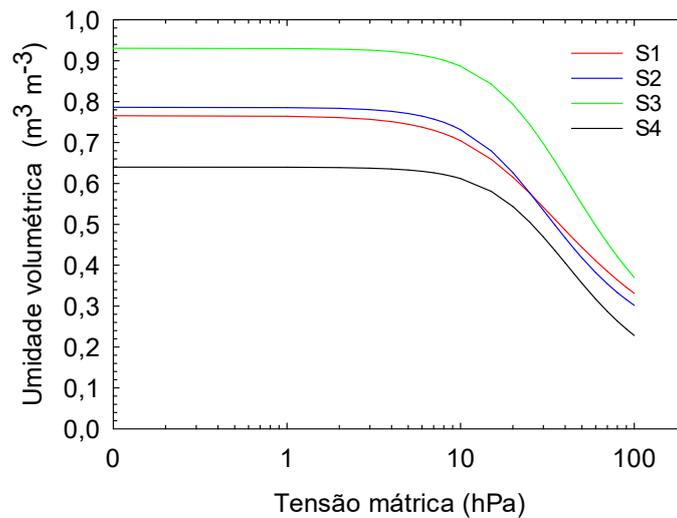


GRÁFICO 14 - CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA DOS SUBSTRATOS ANALISADOS EM ABRIL DE 2016.

Em todas as tensões avaliadas, o substrato S3 teve a maior capacidade de retenção de água. Além disso, o substrato S3 teve a menor densidade seca, o que também se traduz em maior umidade na saturação. As curvas dos substratos S1 e S2 se assemelham bastante, sendo que o S1 possui maior capacidade de retenção de água à baixas tensões, e o S2 possui maior capacidade de retenção à altas tensões. O substrato S4 possui a menor capacidade de retenção de água, o que já foi suposto pela sua alta densidade seca.

## 4.5 HYDRUS 1-D

### 4.5.1 Rosetta

#### **Curva de retenção de água (CRA)**

O programa Hydrus possui acoplada a função de pedotransferência Rosetta (SCHAPP *et al.*, 2001). Para validar essa FPT para substratos, os parâmetros da curva de retenção de água dos dados observados foram estimados, e comparados aos parâmetros simulados. As Tabelas 11 e 12 apresentam os parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

TABELA 11 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA OBTIDOS COM OS PONTOS EXPERIMENTAIS

	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (hPa <sup>-1</sup> )	n	m	RMSE	R <sup>2</sup>
S1E1	0,7871	0,0990	0,0400	1,7180	0,4179	0,0000	1,0000
S1E2	0,7441	0,1684	0,0550	1,7767	0,4372	0,0000	1,0000
S2E1	0,8143	0,1415	0,0422	1,9858	0,4964	0,0000	1,0000
S2E2	0,7580	0,1939	0,0499	2,0029	0,5007	0,0000	1,0000
S3E1	0,9373	0,1620	0,0362	1,9596	0,4897	0,0000	1,0000
S3E2	0,9235	0,0751	0,0312	1,9122	0,4770	0,0000	1,0000
S4E1	0,6404	0,0860	0,0277	2,4121	0,5854	0,0099	0,9978
S4E2	0,6397	0,0867	0,0404	1,8937	0,4719	0,0000	1,0000

$\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação;  $\theta_r$ : umidade volumétrica residual;  $\alpha$ , n, m: parâmetros de ajuste do modelo; RMSE: *root mean square error*; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação.

Em sua maioria, os dados estimados possuíram um RMSE igual a zero, e R<sup>2</sup> igual a 1, o que mostra exatidão e precisão dos dados. Somente o substrato S4E1 diferiu dos demais, porém ainda assim os parâmetros estimados possuem alta precisão com os observados.

TABELA 12 - PARÂMETROS DA CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA SIMULADOS PELO ROSETTA

	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (hPa <sup>-1</sup> )	n	m
S1E1	0,6832	0,0808	0,0101	1,4791	0,3239
S1E2	0,7174	0,1005	0,0192	1,3743	0,2724
S2E1	0,6987	0,0819	0,0170	1,3855	0,2782
S2E2	0,7119	0,0867	0,0235	1,3408	0,2542
S3E1	0,6815	0,0689	0,0149	1,4030	0,2872
S3E2	0,6843	0,0766	0,0123	1,4370	0,3041
S4E1	0,5817	0,0555	0,0350	1,3750	0,2727
S4E2	0,5898	0,0595	0,0366	1,3798	0,2753

$\theta_s$ : umidade volumétrica na saturação;  $\theta_r$ : umidade volumétrica residual;  $\alpha$ , n, m: parâmetros de ajuste do modelo.

O programa Rosetta estimou valores de umidade volumétrica na saturação inferiores aos valores observados.

As curvas de retenção da água para os dados observados e os dados simulados pelo software Rosetta, de um substrato com a sua referida vegetação, encontram-se nos Gráficos 4, 5, 6 e 7.

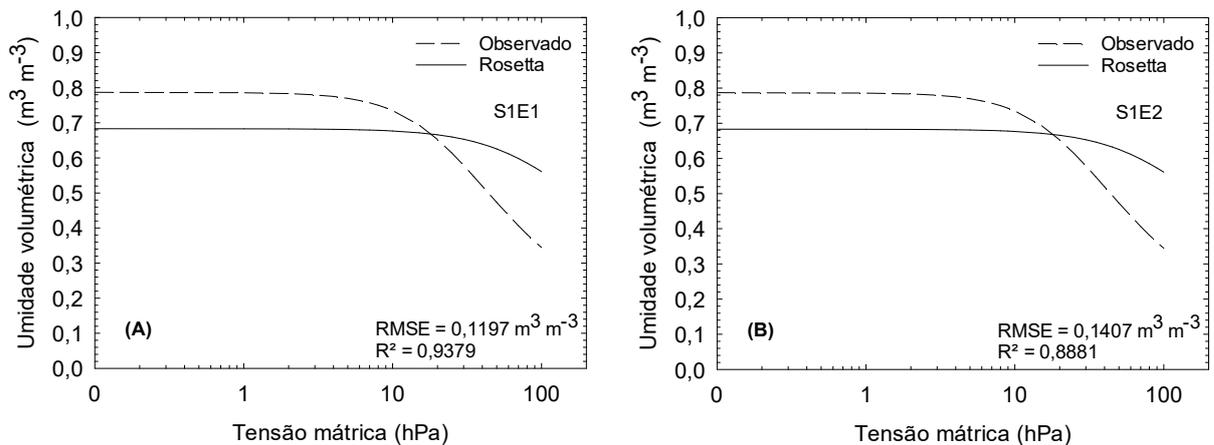


GRÁFICO 15 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S1 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 1 e vegetação 1 (S1E1). B) Substrato 1 e vegetação 2 (S1E2).

As curvas de retenção de água entre os parâmetros observados e os parâmetros simulados pelo Rosetta diferiram bastante.

A FPT Rosetta estimou a umidade na saturação inferior a umidade observada, que decaiu lentamente com o aumento da tensão. O programa Rosetta também estimou perda de água maior somente em altas tensões. Já os valores observados apresentaram maior umidade na saturação, sendo o S1E1 maior do que S1E2, devido à sua menor densidade seca. Como o software Rosetta aceita somente valores de densidades igual ou acima de  $500 \text{ kg/m}^3$ , e as densidades dos substratos S1E1 e S1E2 foram inferiores a este valor, o Rosetta estimou a umidade na saturação menor que a real.

Apesar do S1E1 ter apresentado menor densidade seca que o substrato S1E2, a simulação do Rosetta se comportou melhor para o S1E1, com maior coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9379$ ), ou seja, se comportou com precisão de 94%, mostrando a influência da textura. Os substratos S1E1 e S1E2 mostraram quantidades equivalentes de tamanhos de partículas de areia, porém o S1E1 apresentou maiores quantidades de partículas de tamanho de silte, 0,02 a 0,002 mm. Isso influenciou no espaço poroso, diminuindo a capacidade de retenção de água, e aumentando a porosidade total (umidade na saturação).

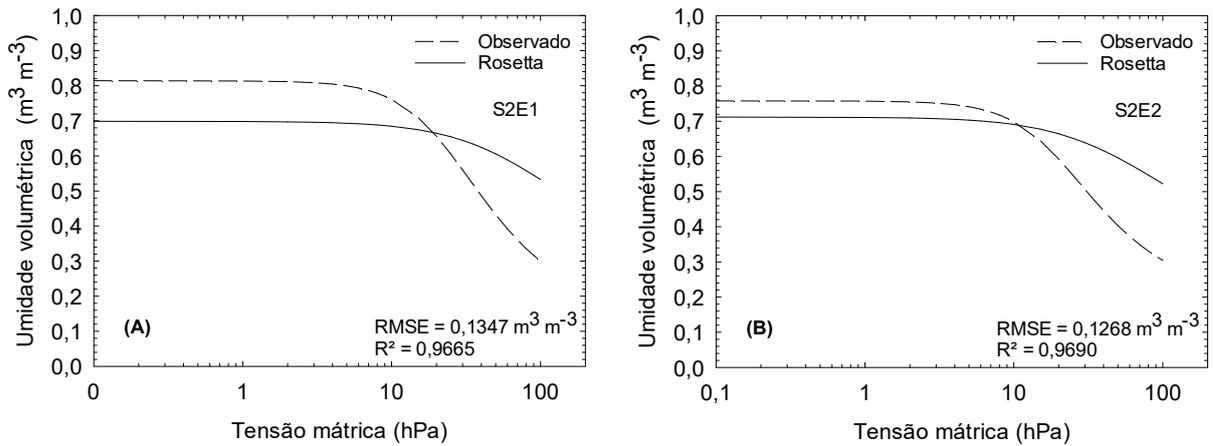


GRÁFICO 16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S2 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 2 e vegetação 1 (S2E1). B) Substrato 2 e vegetação 2 (S2E2).

Devido à maior densidade seca utilizada na FPT Rosetta ( $500 \text{ kg/m}^3$ ) do que a real (observada), o programa estimou valores de umidade de saturação menores que os valores reais. Como a densidade seca do S2E2 foi maior, sendo mais compatível com aquela densidade limite do Rosetta, a sua simulação se comportou melhor para este substrato, com coeficiente de determinação relativamente maior ( $R^2=0,9690$ ), em que teve o RMSE mais próximo de zero. Para os dois substratos, tanto S2E1, quanto S2E2, o software Rosetta estimou uma faixa pequena de umidades, fazendo com que a umidade decaísse lentamente com aumento da tensão.

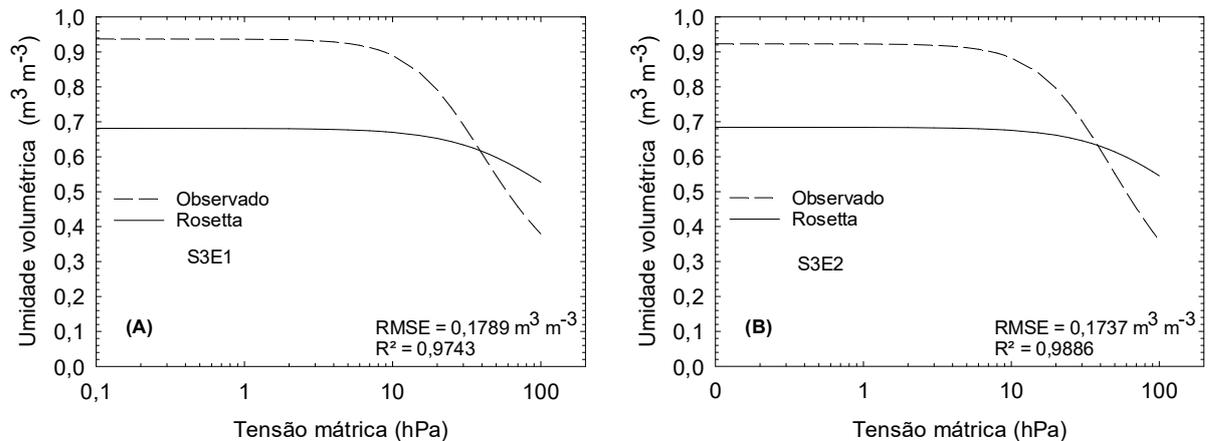


GRÁFICO 17 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S3 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 3 e vegetação 1 (S3E1). B) Substrato 3 e vegetação 2 (S3E2).

Altos valores de umidade na saturação foram observados para os substratos S3E1 e S3E2. No entanto, como as suas densidades secas são baixas, a FPT Rosetta estimou valores reduzidos na saturação. Similarmente aos substratos anteriores, a umidade é reduzida lentamente com o aumento da tensão. A FPT atingiu precisão de aproximadamente 98% em relação aos valores observados.

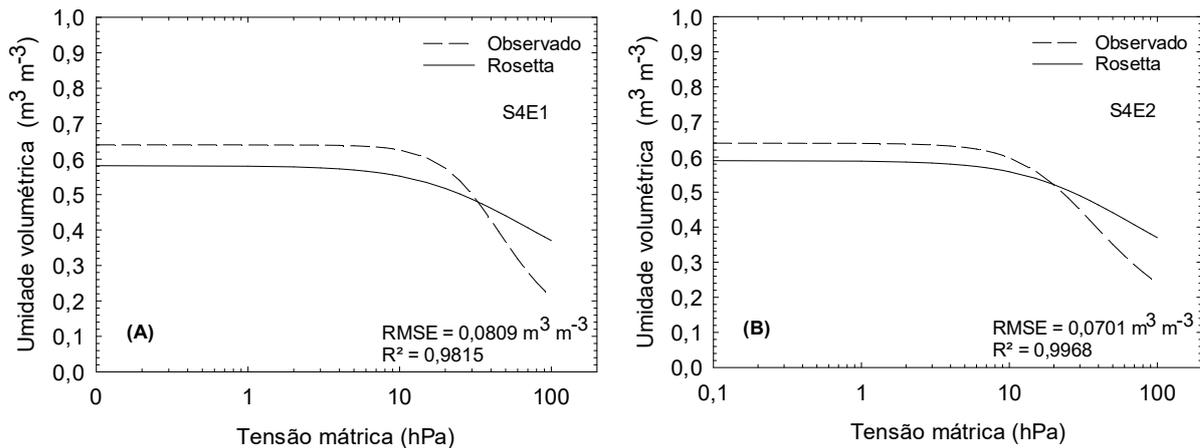


GRÁFICO 18 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SUBSTRATO S4 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 4 e vegetação 1 (S4E1). B) Substrato 4 e vegetação 2 (S4E2).

Os menores valores de RMSE e maiores valores de  $R^2$  foram observados para a simulação do programa Rosetta com o substrato S4. Para os substratos S4E1 e S4E2, as suas densidades secas reais (853 e 854  $\text{kg}/\text{m}^3$ , respectivamente) foram inseridas na simulação para a FPT, o que elevou a umidade na saturação estimada pelo Rosetta.

### **Coefficiente de permeabilidade hidráulica**

Com os resultados obtidos do coeficiente de permeabilidade hidráulica saturado (Tabela 13), foi possível estimar a permeabilidade hidráulica nas diferentes umidades por meio da equação de van Genuchten-Mualem. Os gráficos 6, 7, 8 e 9 mostram as curvas de  $K(\theta)$  dos diferentes substratos com as suas vegetações e com seus valores estimados pela FPT Rosetta.

TABELA 13 - COEFICIENTE DAS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS SATURADAS OBSERVADA E SIMULADA

	Observado	Rosetta
	K <sub>sat</sub> (cm/h)	
S1E1	339	21
S1E2	343	13
S2E1	327	14
S2E2	590	10
S3E1	387	18
S3E2	348	18
S4E1	132	11
S4E2	258	10

K<sub>sat</sub>: coeficiente de permeabilidade hidráulica do substrato saturado.

De acordo com as orientações alemãs FLL (2002), a permeabilidade hidráulica de substratos de telhado verde deve ser maior que 360 cm/h, o que foi obtido somente para o S2E2 e S3E1. Foi verificado que quanto maior a capacidade de retenção de água pelos substratos, menor o coeficiente de permeabilidade hidráulica, ou seja, a drenagem pelo substrato é reduzida.

O software Rosetta estimou valores do coeficiente de permeabilidade hidráulica saturada (K<sub>sat</sub>) inferiores aos valores observados. Isto pode ser explicado pelo fato que esta função de pedotransferência foi construída para solos, os quais são menos permeáveis que substratos.

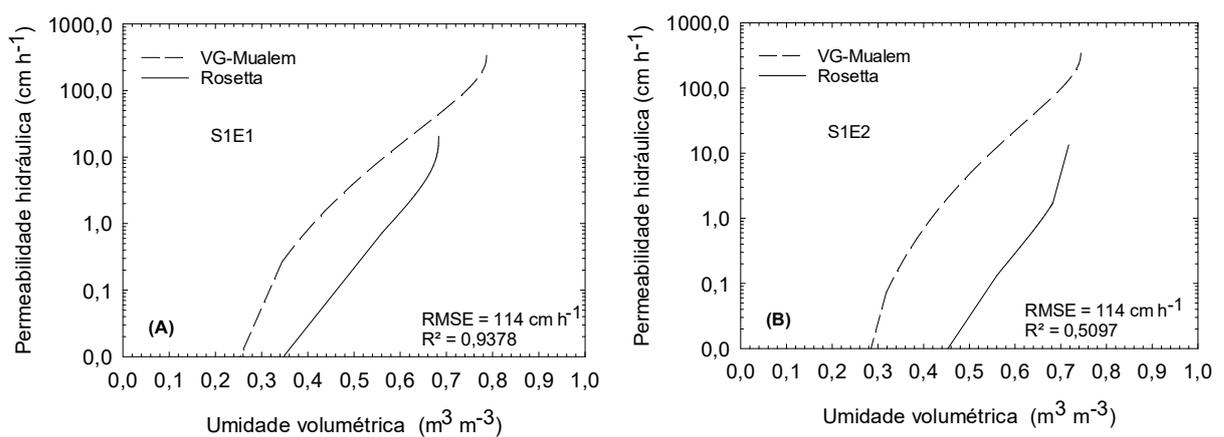


GRÁFICO 19 - COMPARAÇÃO ENTRE PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SUBSTRATO S1 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 1 e vegetação 1 (S1E1). B) Substrato 1 e vegetação 2 (S1E2).

Os substratos S1E1 e S1E2 obtiveram o mesmo RMSE de 114 cm/h quando simulado pela FPT Rosetta, o que significa que teve um erro de 114 cm/h na permeabilidade hidráulica. A simulação do S1E1 teve precisão de 94%, porém, para o S1E2, não houve precisão na simulação, pois a FPT acertou somente 51% dos valores observados. Isto pode ser explicado pelo motivo do software Rosetta não ter conseguido estimar os parâmetros do modelo de forma correta, observando-se uma grande diferença entre o coeficiente de permeabilidade hidráulica saturada, e o coeficiente de permeabilidade hidráulica na umidade seguinte.

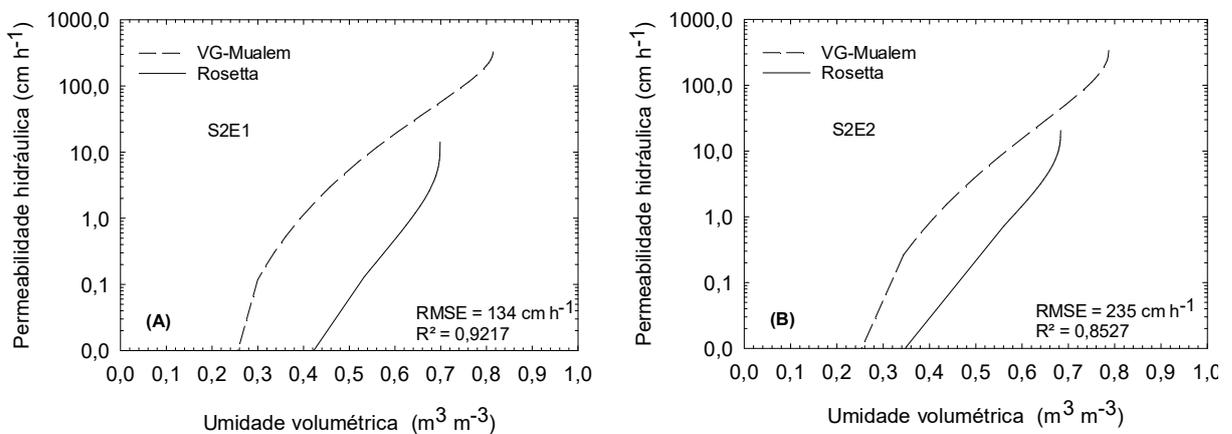


GRÁFICO 20 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO S2 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 2 e vegetação 1 (S2E1). B) Substrato 2 e vegetação 2 (S2E2).

Para o substrato S2, a vegetação E2 teve alta permeabilidade hidráulica, em que foi a maior observada entre todos os substratos, o que reflete em alta drenagem. Além disso, foi o substrato que obteve o maior erro da simulação, de 235 cm/h, em que a precisão foi de somente 85% pela FPT Rosetta.

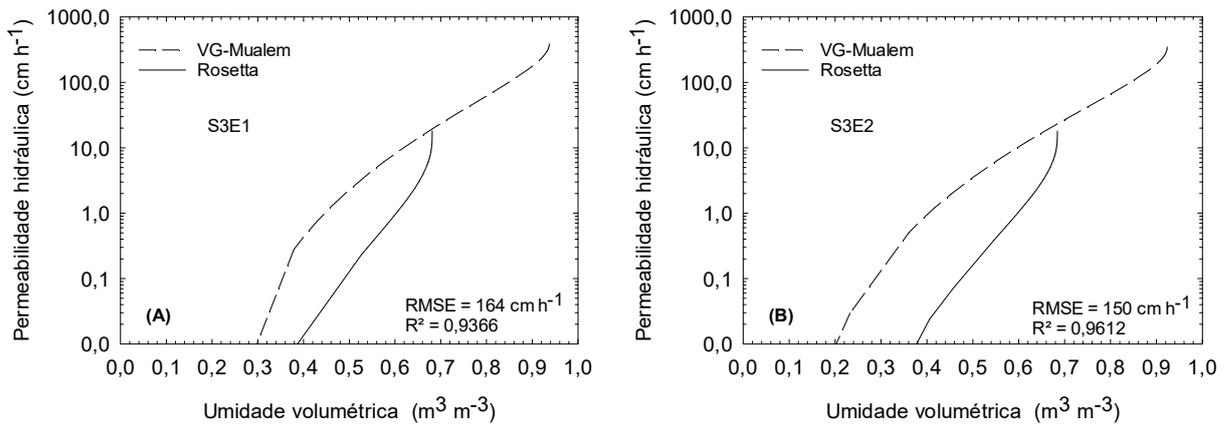


GRÁFICO 21 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO S3 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 3 e vegetação 1 (S3E1). B) Substrato 3 e vegetação 2 (S3E2).

O substrato S3E2 teve a maior precisão dos dados simulados, com  $R^2$  de 0,9612, porém, o erro associado à permeabilidade hidráulica pela FPT Rosetta foi de 150 cm/h.

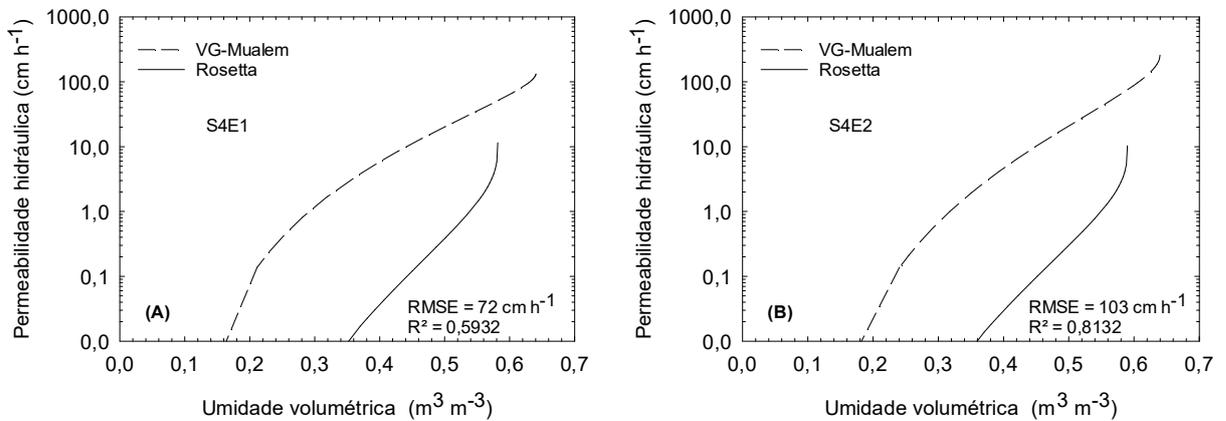


GRÁFICO 22 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO S4 COM OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PELO ROSETTA. A) Substrato 4 e vegetação 1 (S4E1). B) Substrato 4 e vegetação 2 (S4E2).

A simulação da permeabilidade hidráulica em função da umidade pela FPT Rosetta mostrou-se mais exata para o substrato S4, contudo, apresentou baixa precisão, apresentada principalmente pelo S4E1, com 59%. Portanto, para o S4E1, a FTP Rosetta não estimou aceitavelmente os parâmetros do modelo de van Genuchten-Mualem.

O Gráfico 12 apresenta o coeficiente de permeabilidade hidráulica em função da umidade volumétrica para todos os substratos, estimados pelo modelo de van Genuchten-Mualem, e pela FPT Rosetta.

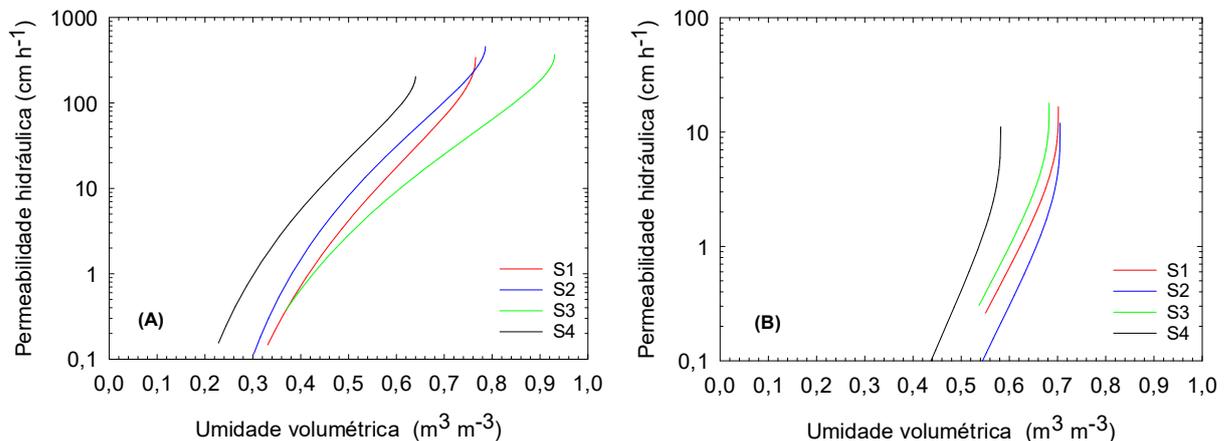


GRÁFICO 23 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PERMEABILIDADES HIDRÁULICAS EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DE TODOS OS SUBSTRATOS. A) DADOS ESTIMADOS POR VG-MUALEM. B) DADOS SIMULADOS PELO ROSETTA

Em relação ao Gráfico 12A, a permeabilidade hidráulica em função da umidade volumétrica foi maior para o substrato S3, e menor para o substrato S4. Os substratos S1 e S2 possuem comportamentos análogos, como também foi observado na curva de retenção de todos os substratos.

Comparando-se os gráficos, evidencia-se a imprecisão e não exatidão dos valores de permeabilidades hidráulicas em função da umidade pela simulação da FPT Rosetta.

#### 4.5.2 Simulação do escoamento superficial do telhado verde

Para a simulação do potencial de escoamento superficial dos substratos analisados no período de 18 meses, utilizou-se o software Hydrus 1-D. Como a condição de contorno superior atmosférica foi utilizada, foram necessários dados de precipitação, e de temperaturas máximas e médias, os quais foram obtidos com dados meteorológicos do SIMEPAR para a região de Curitiba (PR). Estes dados encontram-se no Gráfico 13 (A, C e D), em que o gráfico 13B é referente à

evapotranspiração potencial calculada pelo software Hydrus 1-D pelo método de Hargreaves.

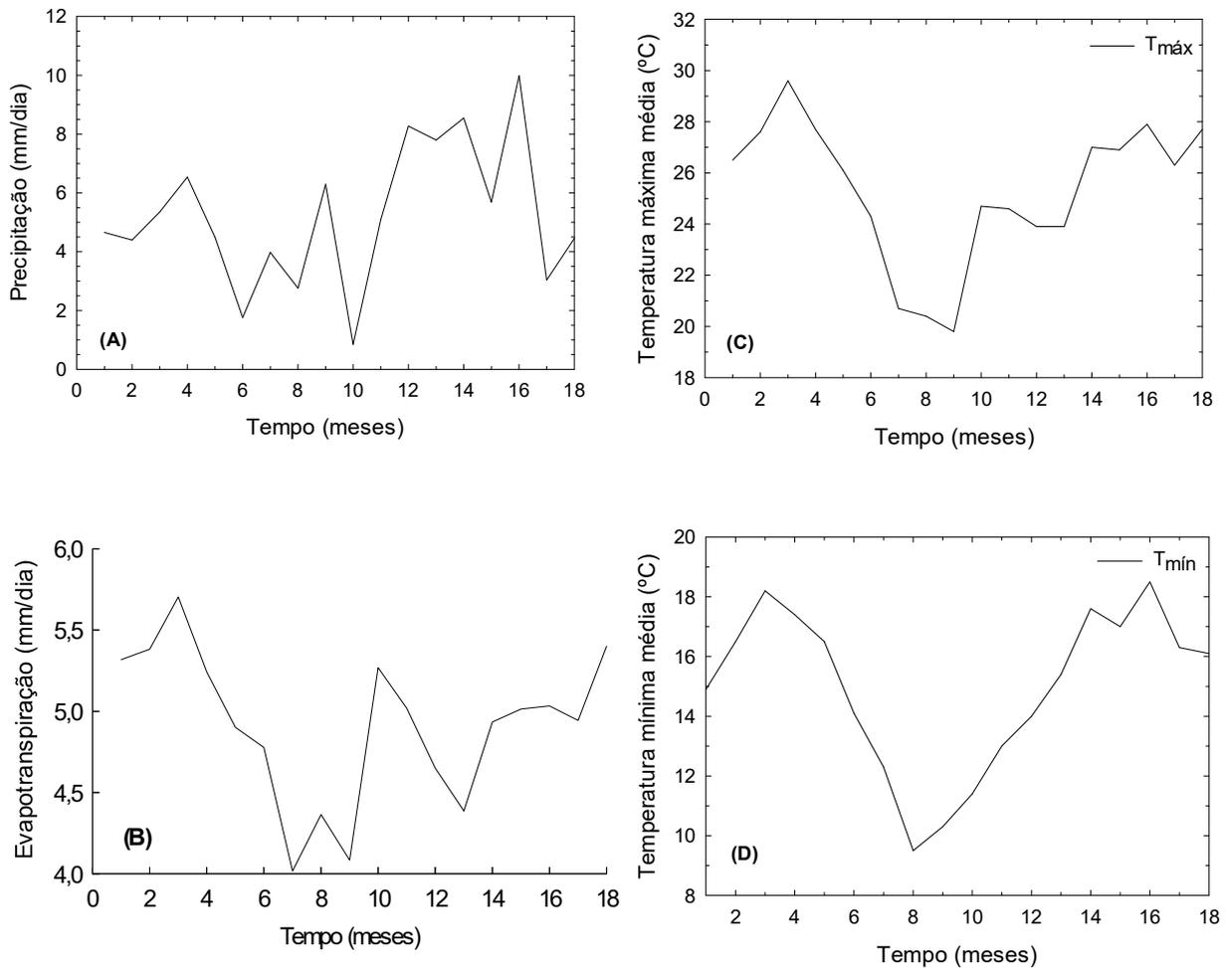


GRÁFICO 24 - DADOS METEOROLÓGICOS DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016. A) PRECIPITAÇÃO. B) EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL GERADA PELO HYDRUS 1-D. C) TEMPERATURA MÁXIMA MÉDIA. D) TEMPERATURA MÍNIMA MÉDIA.

Os meses de fevereiro de 2016 e agosto de 2015 tiveram, respectivamente, a maior e menor precipitação ao longo desses 18 meses. Após a baixa precipitação em agosto de 2015, a precipitação foi aumentada em outubro de 2015 (aproximadamente 8,3 mm/dia), em que a partir deste mês, a precipitação manteve-se alta, com redução em janeiro de 2016, e com seu pico em fevereiro de 2016, com cerca de 10 mm/dia.

Os meses com a maior evapotranspiração foram em dezembro de 2014 e janeiro de 2015, logo após a instalação dos telhados verdes experimentais.

Quando as condições atmosféricas (precipitação, evaporação e transpiração) foram especificadas no software Hydrus 1-D, as quais definem o fluxo potencial de água no limite superior, o fluxo real de água através deste limite dependeu também das condições de umidade do meio poroso. Quando o fluxo de superfície potencial (precipitação) foi maior do que a capacidade de infiltração, supôs-se que qualquer excesso de água na superfície do meio poroso fosse imediatamente removido por escoamento superficial.

Quando a precipitação (infiltração) e a evaporação foram especificadas com a mesma condição de contorno atmosférica, o programa Hydrus calculou o fluxo potencial na fronteira como  $\text{Fluxo} = \text{Precipitação} - \text{Evaporação}$ . Quando este fluxo resultante foi positivo, significou evaporação, e negativo, infiltração. Quando os fluxos potenciais e reais foram comparados, pôde-se observar imediatamente se o fluxo potencial foi reduzido devido às condições do substrato.

Os Gráficos 14 a 21 mostram os resultados obtidos com a simulação dos dados observados do telhado verde pelo software Hydrus 1-D de novembro de 2014 à abril de 2016.

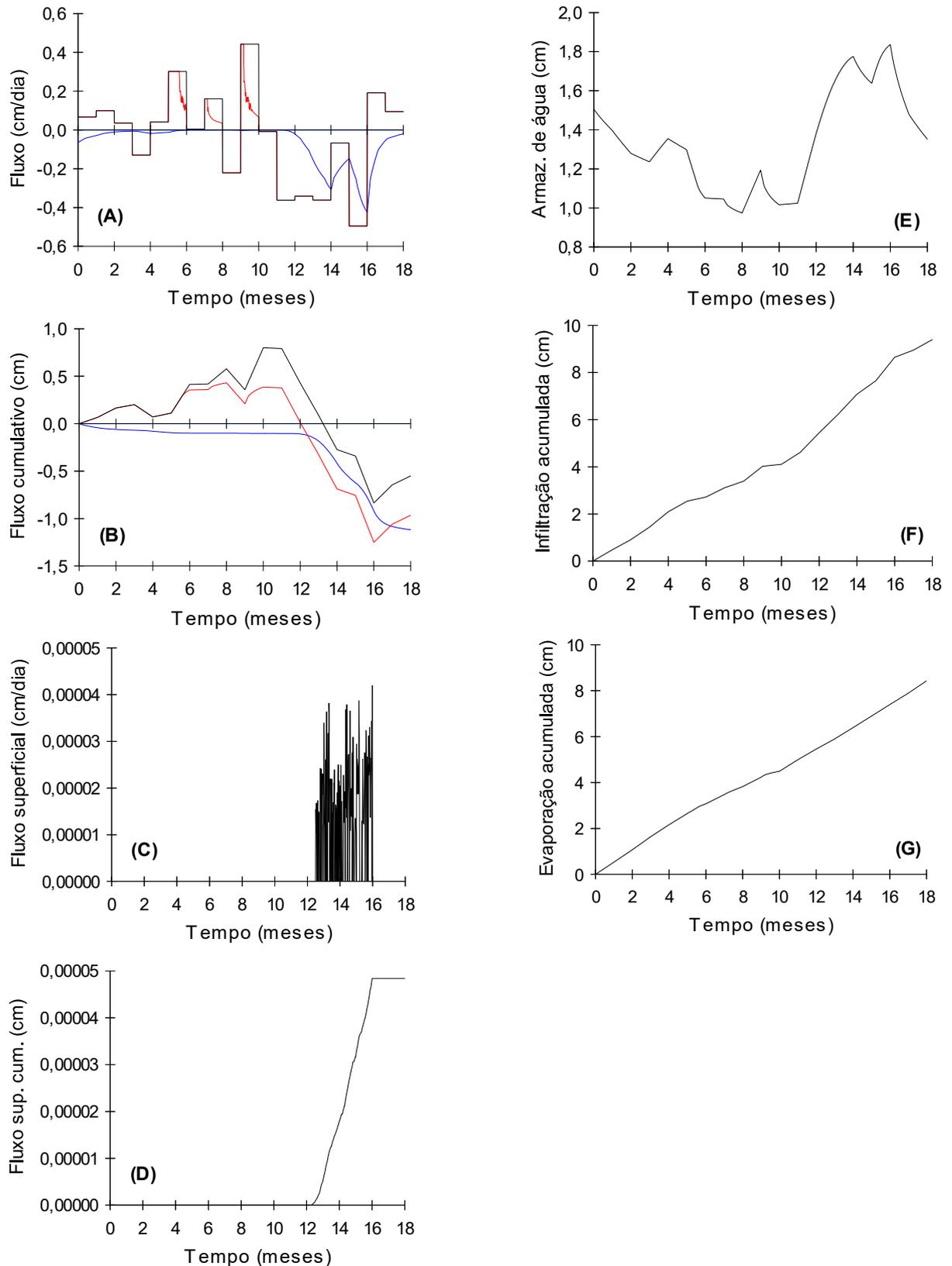


GRÁFICO 25 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S1E1. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL - FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

Reduziu-se a evaporação (fluxo de superfície real) pelo substrato S1 com vegetação E1 (S1E1) nos meses de abril, junho e agosto de 2015, nos quais as menores intensidades de precipitação foram observadas. O fluxo inferior manteve-se constante até setembro de 2015, em que elevou-se a partir de outubro, devido ao aumento na intensidade da precipitação. Em fevereiro de 2016, mês em que observou-se a maior intensidade de precipitação, o fluxo inferior mostrou-se em torno de 0,4 cm/dia.

A evaporação real acumulada foi reduzida em relação à evaporação potencial nos meses de abril à outubro de 2015. A partir de outubro de 2015, a infiltração real acumulada aumentou em relação à infiltração potencial acumulada, tendo seu comportamento similar ao fluxo potencial acumulado, porém com aproximadamente 0,5 cm a mais acumulados.

Devido à alta intensidade de precipitação, o escoamento superficial (*run-off*) iniciou-se em outubro de 2015, em que seu pico, observado no mês de fevereiro de 2016, foi entre 0,00004 e 0,000045 cm/dia. O máximo valor de escoamento superficial acumulado atingido foi de 0,00005 cm/dia.

O armazenamento de água no substrato aumentou significativamente entre os meses de outubro de 2015 e março de 2016. O maior armazenamento de água foi obtido em fevereiro de 2016 com aproximadamente 1,85 cm. Em janeiro de 2016, a intensidade da precipitação foi reduzida, diminuindo o armazenamento de água no substrato. O menor armazenamento de água, cerca de 1,0 cm, foi observado em abril a junho, agosto e setembro de 2015, meses nos quais foram observadas as menores intensidades de precipitação

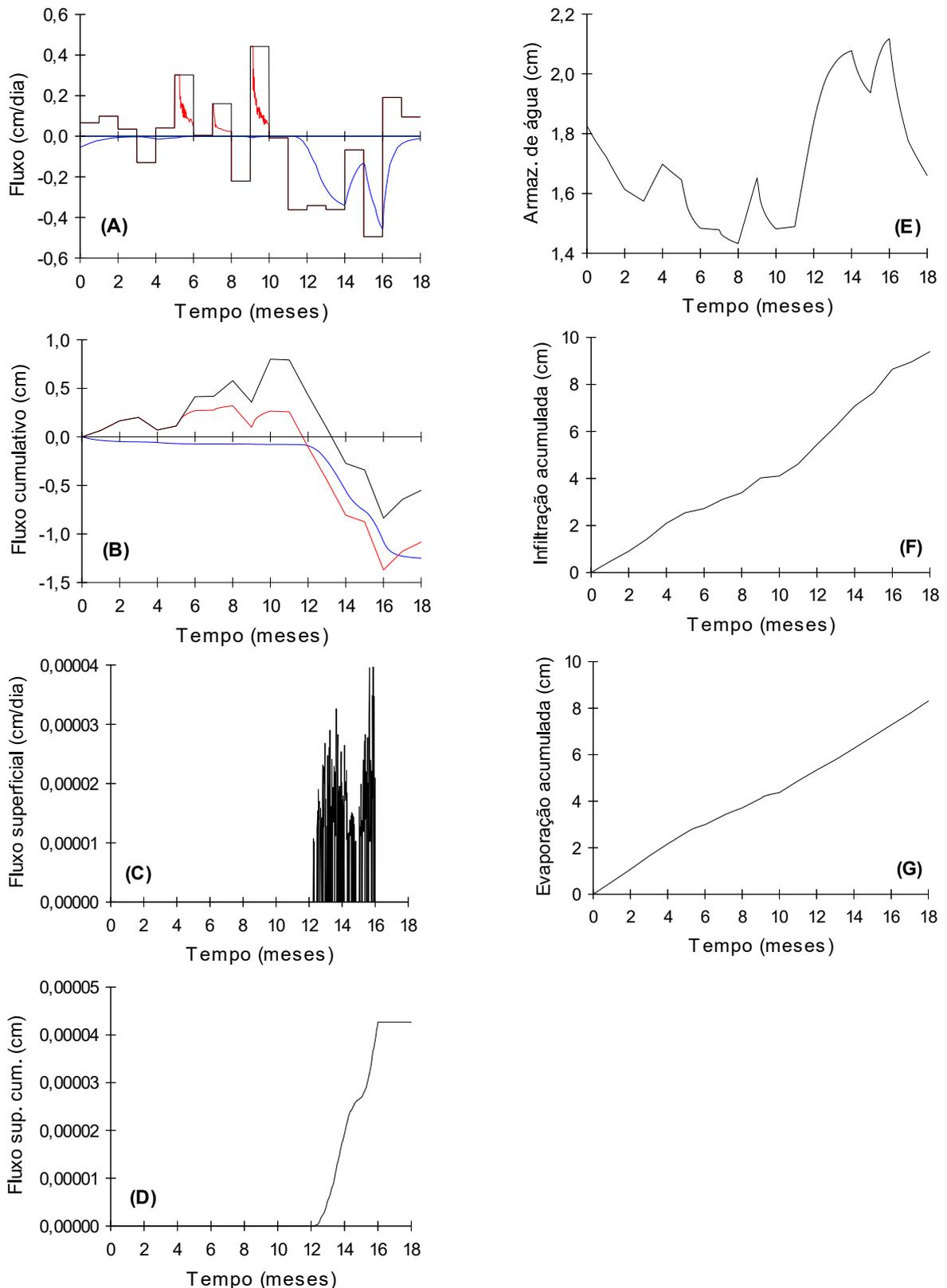


GRÁFICO 26 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S1E2. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL -FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

O S1E2 fez com que tivesse uma redução na evaporação real do substrato nos meses de abril, junho e agosto de 2015. O fluxo inferior foi maior nos meses de dezembro de 2015 e fevereiro de 2016. Os fluxos acumulados foram similares aos obtidos pelo substrato S1E2.

O escoamento superficial iniciou-se em outubro de 2015 e finalizou em fevereiro de 2016. O maior pico foi em fevereiro de 2016, com 0,00004 cm/dia. Em janeiro de 2016 a precipitação foi diminuída, fazendo com que o *run-off* fosse reduzido para aproximadamente 0,000015 cm/dia. Acumulou-se entre 0,00004 e 0,00005 cm de escoamento superficial desde outubro de 2015 até abril de 2016, em que o valor máximo foi atingido em fevereiro de 2016.

Similarmente ao S1E2, os meses de maior armazenamento de água apresentaram-se entre os meses de novembro de 2015 e março de 2016, sendo o armazenamento máximo em fevereiro de 2016 com aproximadamente 2,15 cm. Os menores armazenamentos de água foram obtidos nos meses de maio, junho, agosto e setembro de 2015, sendo o menor valor encontrado em junho com cerca de 1,45 cm de armazenamento. O substrato S1E2 obteve o maior armazenamento de água em relação a todos os substratos, mesmo em épocas secas.

Comparando-se as vegetações do substrato S1, a vegetação E2 (*Sedum acre*) reduziu a evaporação real, aumentando o fluxo inferior, em relação à vegetação E1 (*Arachis repens*). Deste modo, o S1E2 perdeu menos água por evaporação, e assim teve maior disponibilidade (armazenamento) de água para a vegetação. No S1E2, o escoamento superficial (*runoff*) iniciou-se antes, já no começo de outubro de 2015. No mês de janeiro de 2016, o S1E2 fez com que o *runoff* diminuísse. Os picos de runoff foram no mesmo mês, sendo o S1E1 maior, com 0,00005 cm/dia. O armazenamento de água do substrato S1 foi maior com a vegetação E2, com o máximo sendo cerca de 2,15 cm, e o mínimo em torno de 1,45 cm. Quando comparados nos mesmos períodos, o S1E2 obteve maior armazenamento de água em casos de alta (fevereiro de 2016) e baixa (junho de 2015) precipitação.

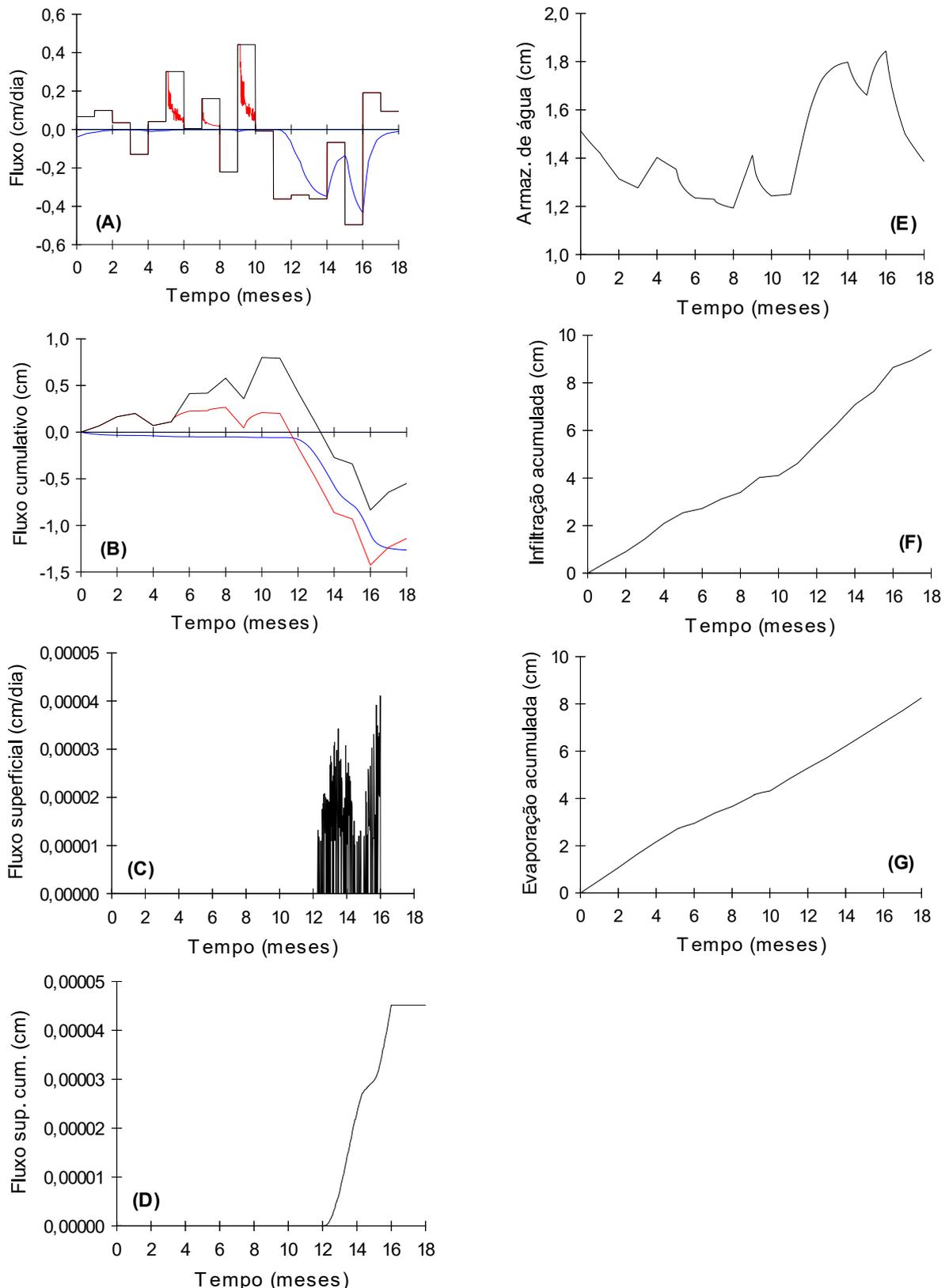


GRÁFICO 27 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S2E1. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL - FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

Analogamente ao substrato S1, observou-se redução na evaporação do substrato S2E1 nos meses de abril, junho e agosto de 2015. Comparando os fluxos potenciais e reais de superfície, aumentou-se mais de 1,0 cm de infiltração acumulada.

O escoamento superficial iniciou-se em outubro de 2015, com um aumento em dezembro de 2015, redução em janeiro de 2016, e o pico em fevereiro de 2016, com aproximadamente 0,00004 cm/dia. Acumulou-se cerca de 0,000045 cm de escoamento superficial até abril de 2016.

O maior armazenamento de água obtido foi em fevereiro de 2016, de aproximadamente 1,85 cm, e o menor valor observou-se em julho de 2015, de 1,2 cm.

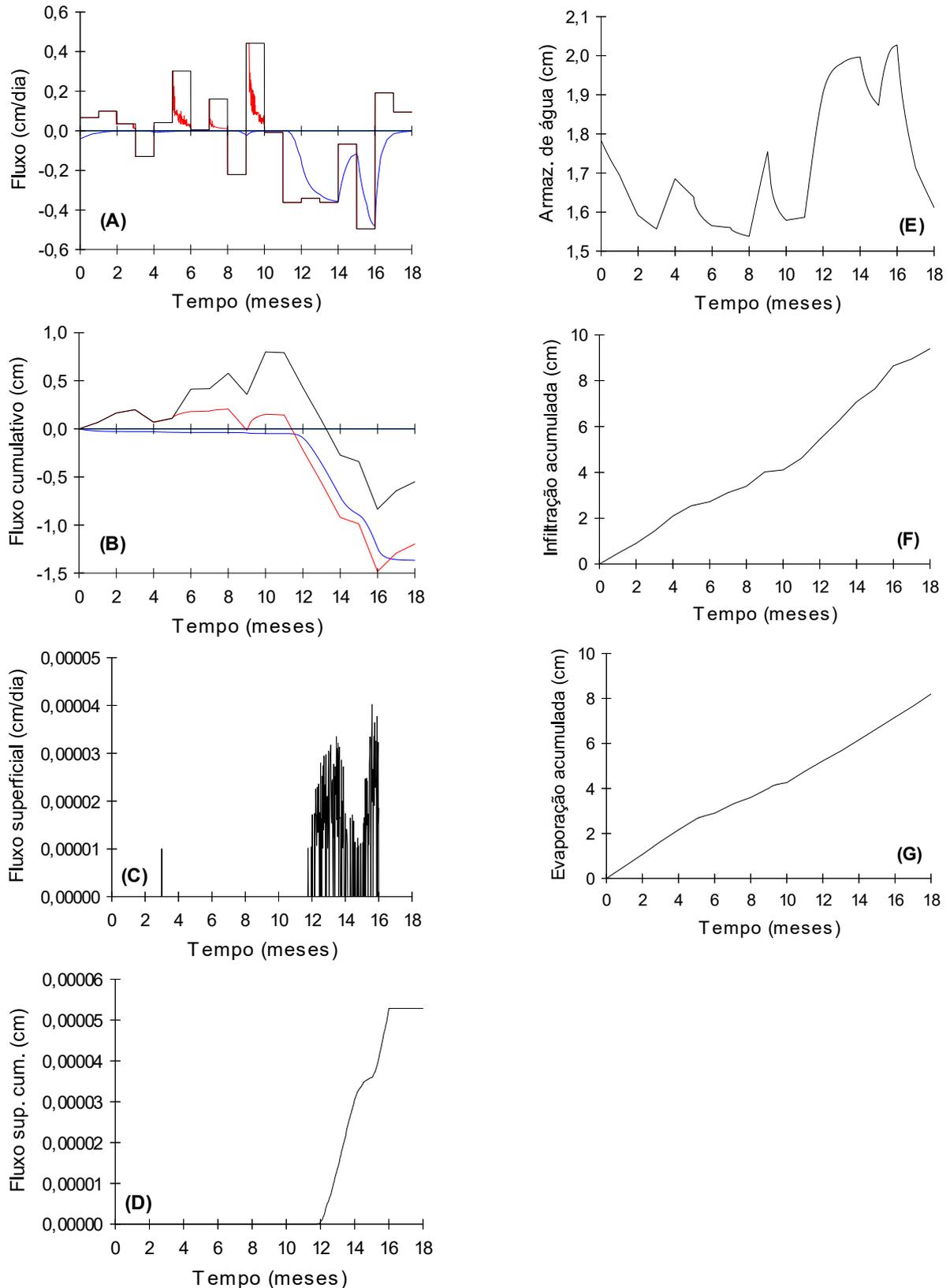


GRÁFICO 28 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S2E2. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL - FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

Com o substrato S2E2, houve redução, apesar de baixa, na evaporação em dezembro de 2014 e janeiro de 2015, e alta redução nos meses de abril, junho e agosto de 2015.

Houve escoamento superficial de 0,00001 cm/dia em fevereiro de 2015, em que só teve um evento, e depois houve o retorno do escoamento superficial somente no início de outubro de 2015, com o valor máximo atingido em torno de 0,000045 cm/dia. O escoamento superficial em fevereiro de 2015 foi observado somente neste substrato. O escoamento superficial acumulado foi entre 0,00005 e 0,00006 cm. O armazenamento máximo de água foi cerca de 2,03 cm e o mínimo em torno de 1,55 cm.

Fazendo a comparação entre as vegetações, S2E2 diminuiu a perda de água para a atmosfera, aumentando o fluxo inferior. Deste modo, o fluxo de superfície acumulado foi diminuído pela evaporação, e aumentado pela infiltração para o S2E2. O fluxo inferior acumulado também foi maior no S2E2.

O comportamento do escoamento superficial entre os meses de outubro de 2015 à fevereiro de 2016 foi similar, porém o escoamento foi iniciado primeiro no S2E2. Diferentemente dos outros substratos, o S2E2 teve escoamento superficial em fevereiro de 2015. Isto se deve ao fato deste substrato ter escoamento superficial já com baixas intensidades de precipitação. O escoamento superficial acumulado foi maior no S2E2 (0,000055 cm), em comparação ao S2E1 (0,000045 cm). O armazenamento de água no substrato com a vegetação 2 foi superior ao obtido com a vegetação 1.

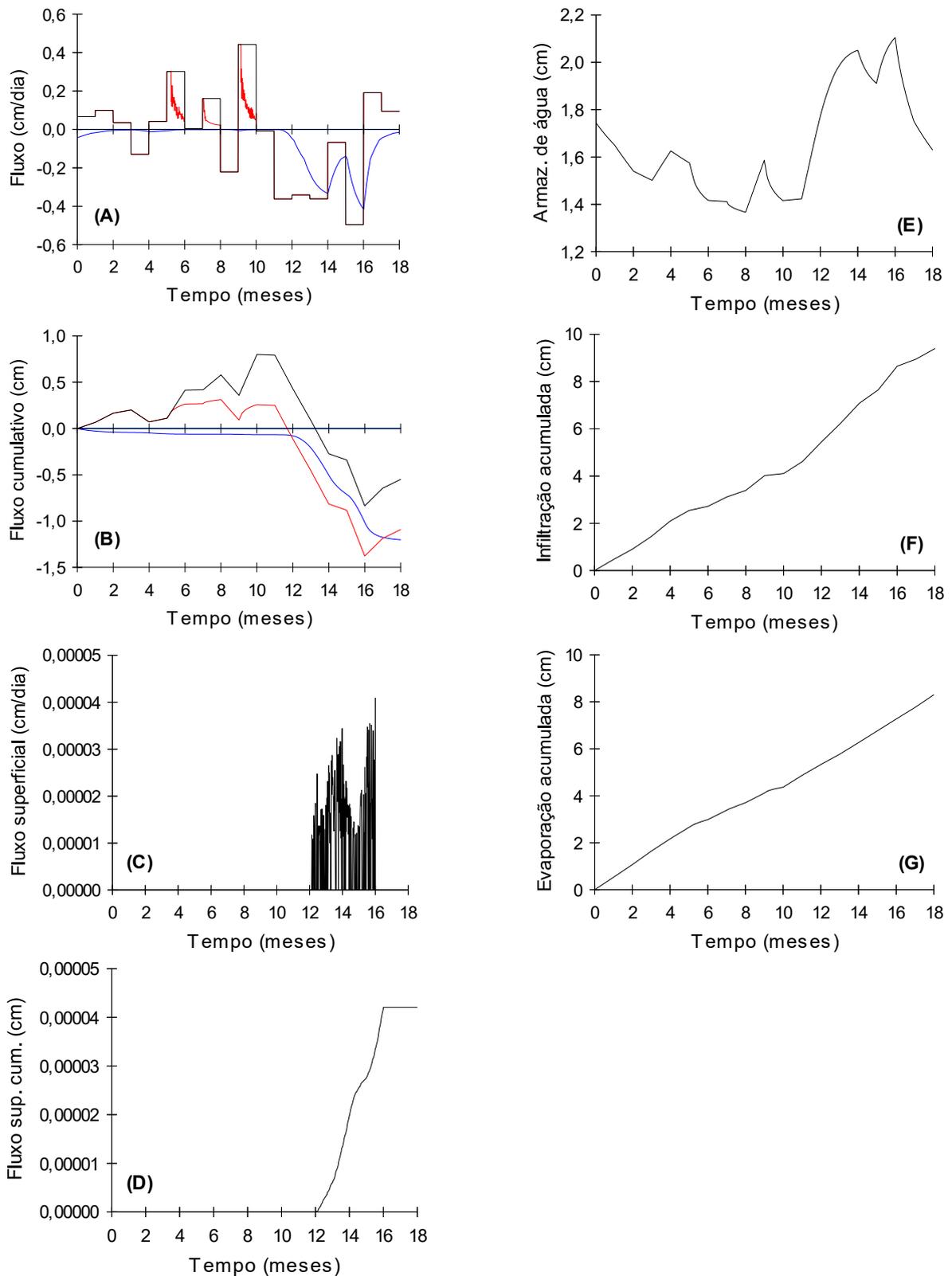


GRÁFICO 29 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S3E1. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL - FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

Para o substrato 3 com a vegetação 1 (S3E1), o escoamento superficial também iniciou-se outubro de 2015, com o valor máximo em torno de 0,00004 cm/dia em fevereiro de 2016. O escoamento superficial acumulado está situado entre 0,00004 e 0,000045 cm/dia. O máximo armazenamento de água foi em torno de 2,1 cm, e o mínimo cerca de 1,35 cm.

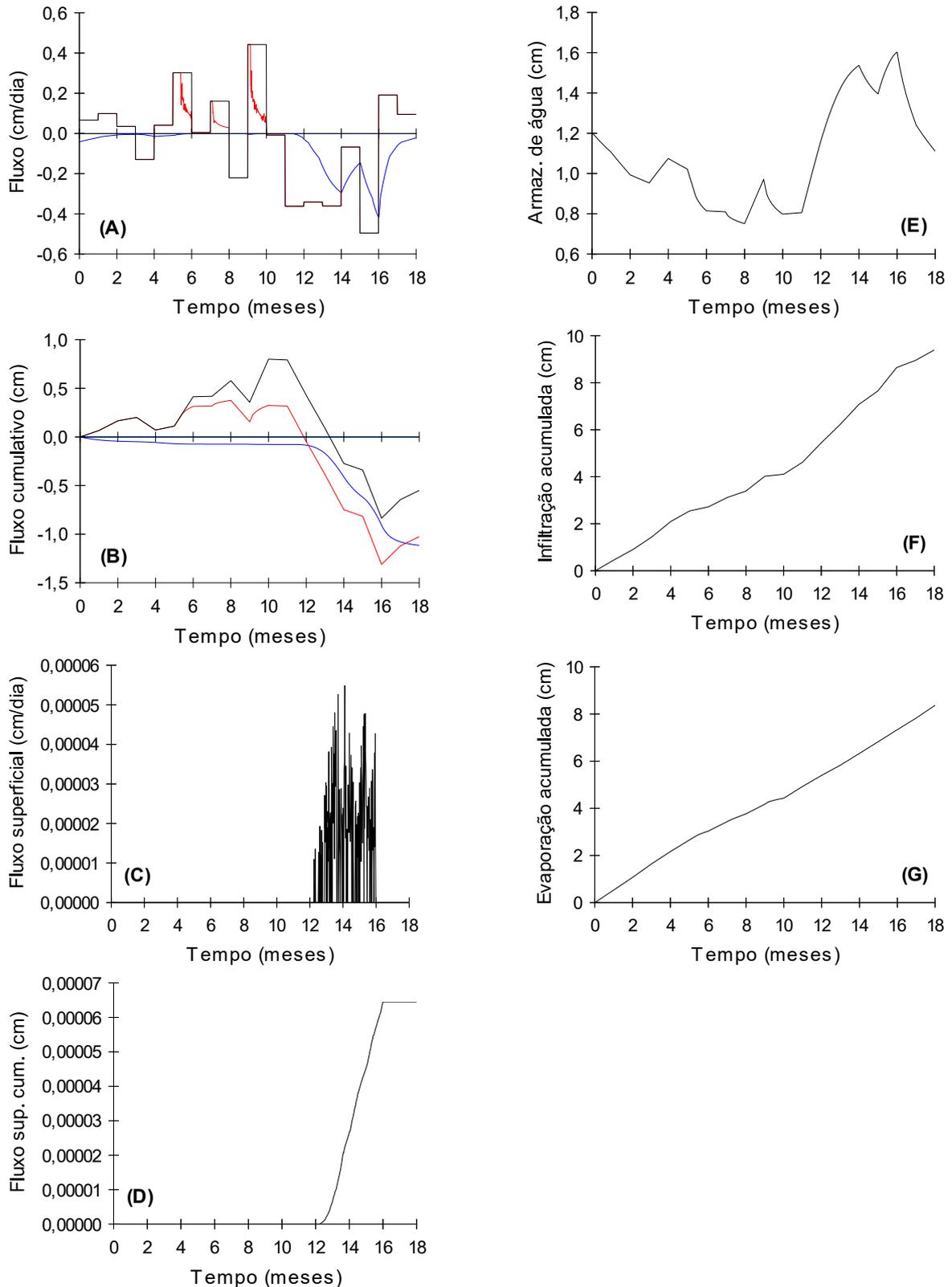


GRÁFICO 30 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S3E2. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL - FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

Diferentemente dos resultados anteriores, para o S3E2, os valores mais elevados do escoamento superficial foram em dezembro de 2015 e começo de janeiro de 2016, com o valor mais alto em torno de 0,000055 cm/dia. Para fevereiro de 2016, em que houve a maior precipitação, o escoamento superficial foi menor, cerca de 0,000043 cm/dia. Acumulou-se aproximadamente 0,000065 cm de escoamento superficial nos meses de outubro de 2015 à abril de 2016.

Para o armazenamento de água, o maior valor foi de 1,6 cm, e o valor mais baixo foi de 0,75 cm.

Comparando-se os substratos com suas respectivas vegetações, o S3E1 reduziu a evaporação real, aumentou a infiltração real, e diminuiu o fluxo inferior. O armazenamento de água foi aumentado pelo S3E1, sendo para o valor máximo de armazenamento, aumentou-se 0,5 cm, e para o mínimo, aumentou-se aproximadamente 0,7 cm, para o mesmo período. Em relação ao escoamento superficial, este foi maior para o S3E2.

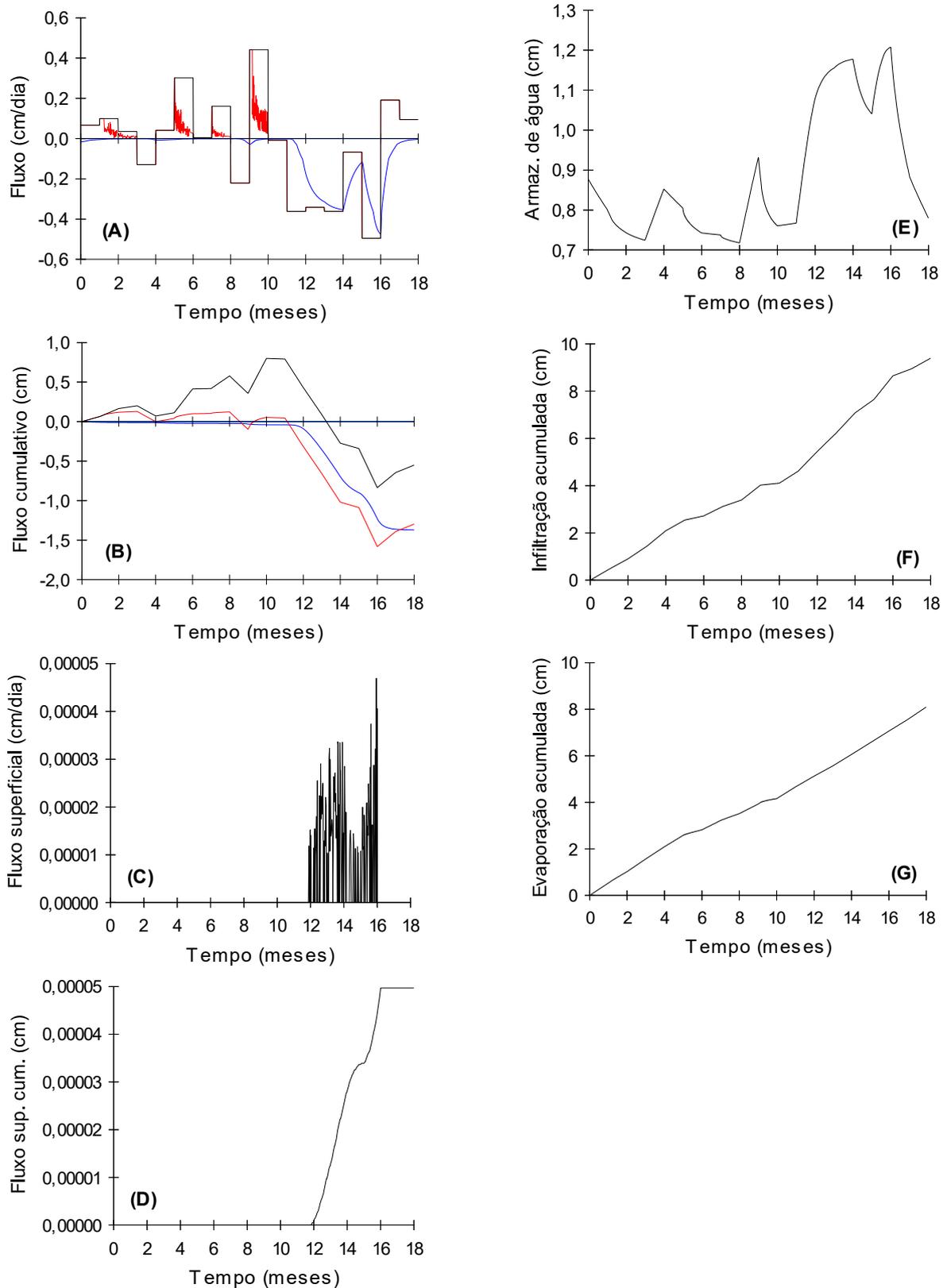


GRÁFICO 31 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S4E1. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL - FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

Diferindo-se todos os substratos, o S4E1 diminuiu consideravelmente a evaporação real nos meses de dezembro de 2014 e janeiro de 2015, além dos meses já citados (abril, junho e agosto de 2015), em que este substrato apresentou a menor perda de água por evaporação, e maior infiltração quando comparado aos outros substratos analisados.

O escoamento superficial teve início já no final de setembro de 2015, com o maior valor em fevereiro de 2016, entre 0,000045 cm/dia e 0,00005 cm/dia. O escoamento superficial acumulado foi de 0,00005 cm. O armazenamento máximo de água foi de 1,2 cm, e o mínimo cerca de 0,7 cm.

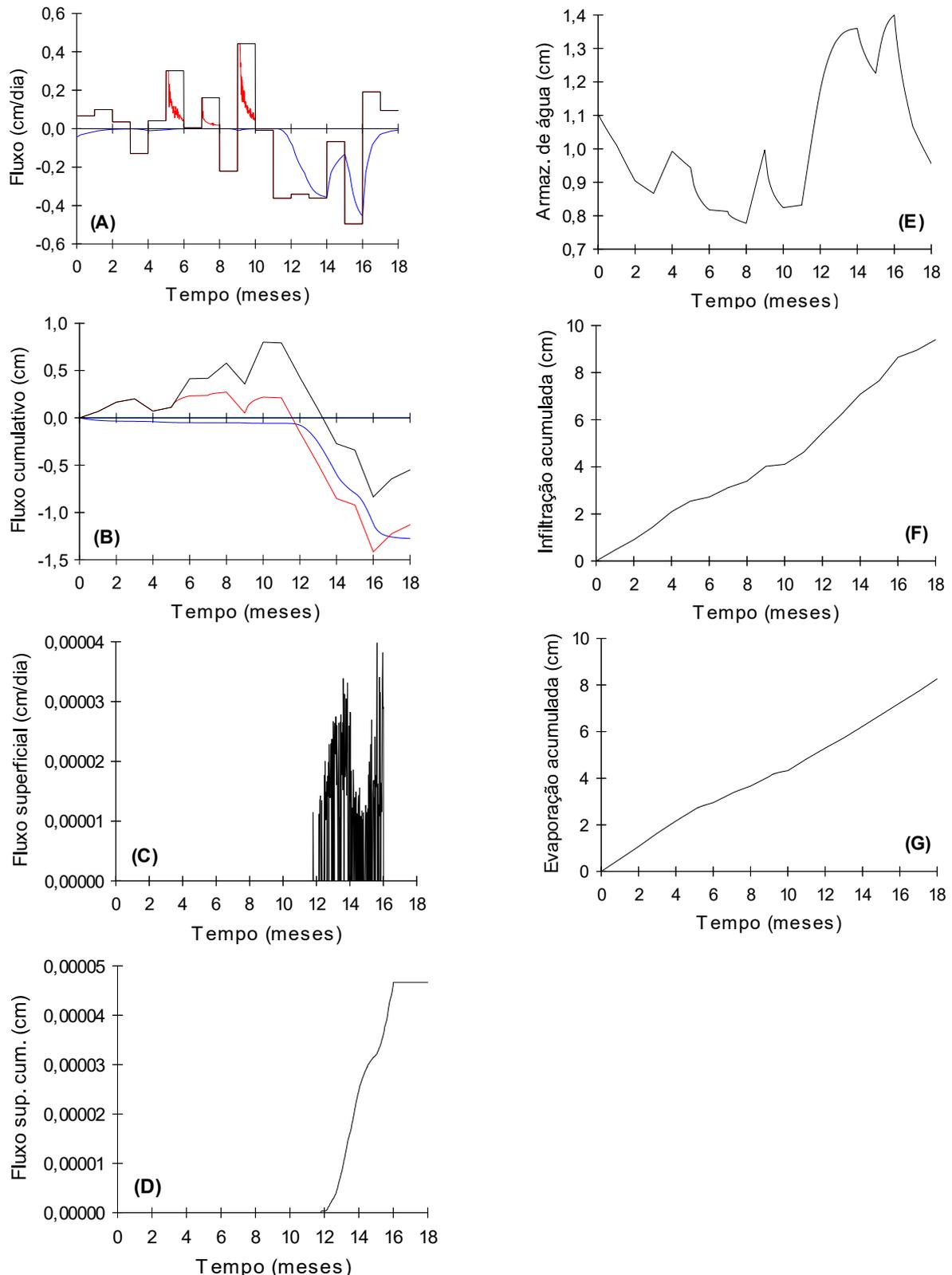


GRÁFICO 32 - RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O HYDRUS 1-D DE NOVEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2016 PARA O SUBSTRATO S4E2. A) FLUXOS (PRETO - FLUXO POTENCIAL DE SUPERFÍCIE; VERMELHO - FLUXO REAL DE SUPERFÍCIE; AZUL - FLUXO INFERIOR). B) FLUXOS CUMULATIVOS. C) FLUXO SUPERFICIAL (*RUN-OFF*). D) FLUXO SUPERFICIAL CUMULATIVO (*RUN-OFF*). E) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. F) INFILTRAÇÃO ACUMULADA. G) EVAPORAÇÃO ACUMULADA.

Como na maioria dos substratos, o S4E2 teve redução da evaporação potencial pela evaporação real nos meses de abril, junho e agosto de 2015.

Igualmente ao substrato S4E1, o escoamento superficial já teve início no final de setembro de 2015, tendo seu pico em fevereiro de 2016 de 0,00004 cm/dia. O armazenamento máximo de água foi de 1,4 cm e mínimo em torno de 0,8 cm.

Comparando as vegetações dos substratos S4, não houve diferença no início de escoamento superficial, porém, a vegetação E2 reduziu a quantidade de escoamento superficial. Além disso, o S4E2 teve maior armazenamento de água. Contudo, o S4E1 obteve maior redução da evaporação.

Comparando-se os Gráficos F e G das simulações pelo Hydrus 1-D de todos substratos, para o mês de outubro de 2015 (mês 12), elevou-se a infiltração acumulada, enquanto que a evaporação acumulada aumentou de modo constante. Deste modo, observou-se o potencial de escoamento superficial pelos substratos no mês de outubro de 2015, quando a intensidade da precipitação foi aumentada, mostrando a forte influência da precipitação no escoamento superficial.

O menor valor de escoamento superficial obtido foi pelo substrato S1E2, com 0,00004 cm/dia. Obteve-se maior armazenamento de água nos meses avaliados pelo S2E2, seguido pelo S1E2. Contudo, o S2E2 atingiu maior escoamento superficial, quando comparado ao S1E2. Além disso, o S2E2 apresentou um evento de escoamento superficial em fevereiro de 2015, mostrando que esse substrato tem potencial de escoamento superficial quando a intensidade da precipitação é igual ou maior que 6,5 mm/dia, apesar de seu alto valor de coeficiente de permeabilidade hidráulica saturada, ou seja, de sua alta drenagem.

## 5 CONCLUSÃO

Os substratos analisados possuem pelo menos metade de sua composição constituída por partículas grandes, o que reflete nos tamanhos de poros, e conseqüentemente, na capacidade de retenção de água. Para substratos de telhados verdes é necessário que haja alta capacidade de retenção de água, atendendo as necessidades fisiológicas das vegetações, e assim possuindo boa cobertura da vegetação no telhado verde, aumentando a sua eficiência energética e retenção de águas pluviais.

As densidades dos substratos foram baixas, exceto para o substrato S4, o que mostra que são substratos extremamente orgânicos e porosos, e assim, poderão aliviar a carga sobre o telhado verde.

Com a vegetação do telhado verde, aumentou-se a capacidade do substrato em reter água, em que foi observado que o substrato S3 teve a maior capacidade de retenção de água, que se reflete no menor valor de densidade seca obtido. Observou-se que os substratos analisados possuem alta capacidade de retenção de água na saturação, o que se traduz em baixo espaço de aeração. Deste modo, reduziu-se a porção de ar disponível para as plantas, em que as raízes da vegetação podem ficar sem oxigenação, levando à mortalidade da planta por asfixia.

Para a curva de retenção de água, a função de pedotransferência Rosetta teve erro médio de 0,1282 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> da umidade volumétrica, e precisão de 96% em relação aos valores observados. Para a permeabilidade hidráulica dos substratos em função da umidade, a FPT Rosetta apresentou erro médio de 136 cm/h e precisão de 82% dos dados observados. Estes resultados mostram que a FPT Rosetta não apresentou exatidão com os valores observados e, portanto, a sua utilização na estimativa de parâmetros hidráulicos para substratos não é adequada.

Comparando-se os gráficos de precipitação acumulada com a evaporação acumulada nos meses de novembro de 2014 a abril de 2016, gerados pelo programa Hydrus 1-D, observou-se que a partir de outubro de 2015, a precipitação acumulada teve um aumento, sobrepondo a evaporação acumulada. Isso se deve ao fato de que em outubro de 2015, a intensidade da precipitação média foi de 8,27 mm/dia. Em geral, o escoamento superficial teve início em outubro de 2015. Portanto, os substratos analisados possuem potencial de escoamento superficial

para precipitações superiores a 8 mm/dia, em que seu fluxo é determinado pelas condições do substrato, além da precipitação e evaporação antecedentes. O máximo valor de escoamento superficial atingido foi para o substrato S3E2 em torno de 0,000055 cm/dia, e o mínimo de 0,00004 cm/dia pelo S1E2. O escoamento superficial médio foi de 0,00005 cm/dia. Deste modo, obtiveram-se baixos valores de escoamento superficial, mostrando a grande capacidade de permear água pelos substratos analisados, o que foi evidenciado pelos altos coeficientes de permeabilidade hidráulica, sendo ideais para utilização em telhados verdes devido à alta drenagem. Contudo, como houve potencial de escoamento superficial, partículas de substrato podem ter sido carreadas a longo prazo para fora do sistema, desestruturando o meio poroso, e modificando as propriedades físico-hidráulicas relacionadas.

O substrato S4E1 atingiu a menor evapotranspiração e a maior infiltração nos meses avaliados, necessitando, portanto, de menor frequência de irrigação, e assim, menor manutenção do telhado verde.

Para região de Curitiba (PR), o S1E2 (casca de pinus e casca de arroz carbonizada com vegetação *sedum acre*) é o substrato mais indicado para telhados verdes extensivos, devido ao maior espaço de aeração, apresentando maior oxigenação para as raízes da vegetação; as suas propriedades físico-hidráulicas situam-se na faixa ideal (densidade seca, água facilmente disponível, água tamponante, água remanescente e água disponível); apresentou o menor escoamento superficial (0,00004 cm/dia), sofrendo menor risco de escoamento superficial para não perder seu material poroso e, foi o substrato que teve o maior armazenamento de água, evidenciado pelos resultados da capacidade de retenção de água, e pela simulação do software Hydrus 1-D. Portanto, o substrato S1E2 apresentou alto armazenamento de água para a vegetação, melhorando o conforto térmico abaixo dele, sem negligenciar a mínima necessidade de aeração.

## REFERÊNCIAS

- ANDRIOLO, J. L.; DUARTE, T. S.; LUDKE, L.; SKREBSKY, E. C. **Caracterização e avaliação de substratos para o cultivo do tomateiro fora do solo.** *Horticultura Brasileira*. Brasília, v. 17, n. 3, p. 215-219, novembro 1999.
- ASKIN, T.; ÖZDEMİR, N. **Soil bulk density as related to soil particle size distribution and organic matter content.** Samsun, Turquia. 2003
- BARRETO CVG; TESTEZLAF R; SALVADOR CA. 2012. **Dinâmica do potencial matricial em substratos de pinus e coco sob ação da capilaridade.** *Horticultura Brasileira* 30: 26-31.
- BEATRICE, C. C. **Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações.** 2011. Tese (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Carlos - SP.
- BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A.-H.; GHAFARIANHOSEINI, A. **State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs.** *Applied Energy*, v. 115, p. 411–428, 2014.
- BLANK, L.; VASL, A.; LEVY, S.; GRANT, G.; KADAS, G.; DAFNI, A.; BLAUSTEIN, L. **Directions in green roof research: A bibliometric study.** *Building and Environment* 66 (2013) 23-28
- BOSA, N.; CALVETE, E. O.; KLEIN, V. A.; SUZIN, M. **Crescimento de mudas de gipsofila em diferentes substratos.** *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 21, n. 3, p.514-519, julho-setembro 2003.
- CÂMARA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://www.camara.sp.gov.br/blog/telhados-verdes-sao-nova-tendencia-em-sao-paulo/>>. Acesso em 26/11/2015.
- CARRIJO, O. A.; VIDAL, M. C.; REIS, N. V.; SOUZA, R. B.; MAKISHIMA, N. **Produtividade do tomateiro em diferentes substratos e modelos de casas de vegetação.** *Horticultura Brasileira*, Brasília, v.22, n.1, p.05-09, jan-mar 2004.
- CÁSSARO, F. A.; PIRES, L. F.; SANTOS, R. A.; GIMÉNEZ, D. REICHARDT, K. **Funil de haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação.** *Rev. Bras. Ciênc. Solo* vol. 32 no. 6 Viçosa Nov./Dec. 2008

CASTLETON, H. F.; STOVIN, V.; BECK, S.B; DAVISON, J. B. **Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit.** Energy and Buildings 42 (2010) 1582–1591

CINEXPAN – Indústria e Comércio de Argila Expandida Ltda. Disponível em: <<http://www.cinexpan.com.br/argila-expandida-0500-cinexpan.html>>. Acesso em 12/06/2016

CORÁ, J.E.; FERNANDES, C. **Curva característica de retenção de água para substratos.** In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATOS PARA PLANTAS - Materiais Regionais como substrato, 6, Fortaleza, 2008.

DE BOODT, M.; VERDONCK, O. **The physical properties of the substrates in horticulture.** Acta Horticulturae, Wageningen, v. 26, p. 37-44, 1972.

FERMINO, M. H. **Métodos de análise para caracterização física de substratos para plantas.** 2003. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FERMINO, M. H.; KÄMPF, A. N. **Densidade de substratos dependendo dos métodos de análise e níveis de umidade.** *Horticultura Brasileira* 30: 75-79. 2012

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E. **Bulk density and relationship air/water of horticultural substrate.** Sci. Agric. (Piracicaba), v.61, n.4, p.446-450, 2004

FERRAZ, I. L.; LEITE, B. C. **Amendoim no telhado: O comportamento da grama-amendoim (*Arachis repens*) na cobertura verde extensiva.** VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis - Vitória – ES - BRASIL - 7 a 9 de setembro de 2011

FERRAZ, M. V.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N. **Caracterização física e química de alguns substratos comerciais.** Maringá, v. 27, n. 2, p. 209-214, April/June, 2005

FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. **Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof Sites.** 2002

GRACESON, A.; HARE, M.; MONAGHAN, J.; HALL, N. **The water retention capabilities of growing media for green roofs.** Ecological Engineering 61 (2013) 328–334

GRACESON, A.; MONAGHAN, J.; HALL, N.; HARE, M. **Plant Growth responses to different growing media for green roofs.** Ecological Engineering 69 (2014) 196–200

GREEN ROOF CODE. **Green Roof Code of Best Practice for the UK 2011.** Publicado por Groundwork Sheffield University.

GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. **Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada.** R. Bras. Ci. Solo, 28:1069-1076, 2004

HAINES, W. B. **Studies in the physical properties of soil v. the hysteresis effect in capillary properties, and the modes os moisture distribution associated therewith.** Journ. Agric. Soi. XX. p. 97-116. 1930

HARGREAVES, G., SAMANI, Z. 1985. **Reference crop evapotranspiration and temperature.** Applied Engineering in Agriculture 1 (2), 96–99.

HILTEN, R. N.; LAWRENCE, T. M.; TOLLNER, E. W. **Modeling stormwater runoff form green roofs with HYDRUS-1D.** Journal of Hydrology (2008) 358, p. 288– 293

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. **Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis.** Revista Árvore, Viçosa-MG, v.37, n.6, p.1103-1113, 2013

LI, W. C.; YEUNG, K. K. **A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective.** International Journal of Sustainable Built Environment (2014) 3, 127–134

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo.** EDUSP, São Paulo, 335p., 2005.

LONDRA, P. A. **Simultaneous Determination of Water Retention Curve and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Substrates Using a Steady-state Laboratory Method.** HortScience 45 (7). p. 1106–1112. 2010.

MACHADO NETO, N. B.; CUSTÓDIO, C. C.; CARVALHO, P. R.; YAMAMOTO, N. L.; CACCIOLARI, C. **Casca de pinus: avaliação da capacidade de retenção de água e da fitotoxicidade.** Colloquium Agrariae, v.1, n.1, set. 2005, p. 19-24.

MAPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 17, 21 de maio de 2007.** Aprova os Métodos Analíticos Oficiais para Análise de Substratos e Condicionadores de Solos, na forma do Anexo à presente Instrução Normativa.

MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R.; SIQUEIRA, W. J.; FEICHTENBERGER, E.; CARVALHO, M. R. **Tolerância de híbridos e de clones de porta-enxertos de citros à infecção de raízes por *Phytophthora nicotianae*.** Fitopatol. bras. v29 n.2 Brasília mar./abr. 2004

MENEZES JÚNIOR, F. O.; FERNANDES, H. S.; MAUCH, C. R.; SILVA, J. B. **Caracterização de diferentes substratos e seu desempenho na produção de mudas de alface em ambiente protegido.** *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 18, n. 3, p. 164-170, novembro 2000.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. **Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?** *Landscape and Urban Planning* 77 (2006) 217–226

MUALEM, Y. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** *Water Resources Research*, 12:513-522, 1976.

PAULUS D.; PAULUS E. 2007. **Efeito de substratos agrícolas na produção de mudas de hortelã propagadas por estaquia.** *Horticultura Brasileira* 25: 594-597.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solos com problema resolvidos.** 2ª edição, 2015.

REVISTA EXAME. Disponível em:  
<<http://exame.abril.com.br/mundo/noticias/predios-novos-na-franca-deverao-ter-telhado-verde-ou-solar>>. Acesso em 26/11/2015.

ROSSETI, K. A.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J.; NOGUEIRA, M. C.; NOGUEIRA, J. S. **Abordagens sistêmicas dos efeitos da implantação de telhados vegetados.** *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, Ituiutaba, v. 4, n. 1, p. 55-77, jan./jun. 2013

SANTOS, P. T.; SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S.; ANTONINO, A. C. **Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial.** *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 161-174, jan./mar. 2013.

SCHAPP, M. G., LEJI, F. J., van GENUCHTEN, M. Th. **Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions.** Journal of Hydrology 251, 163–176. 2001

SCHMITZ, J. A.; SOUZA, P. V.; KÄMPF, A. N. **Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes.** Ciência Rural, Santa Maria, v.32, n.6, p.937-944, 2002

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M. **The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 4.08.** Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 296pp. 2009

SODRÉ, G. A.; CORÁ, J. E.; SOUZA JÚNIOR, J. O. **Caracterização física de substratos à base de serragem e recipientes para crescimento de mudas de cacaureio.** Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 29, n. 2, p. 339-344, Agosto 2007

SOUZA, P. V.; CARNIEL, E.; FOCESATO, M. L. **Efeito da composição do substrato no enraizamento de estacas de maracujazeiro azedo.** Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 28, n. 2, p. 276-279, Agosto 2006

SPALA, A.; BAGIORGAS, H. S.; ASSIMAKOPOULOS, M. N.; KALAVROUZOTIS, J.; MATTHOPOULOS, D.; MIHALAKAKOU, G. **On the green roof system. Selecton, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece.** Renewable Energy 33 (2008) 173–177

SUGINO, E.; MARTINS, A. N.; MINAMI, K.; NARITA, N.; PERDONÁ, M. J. **Efeito da porosidade do substrato casca de pinus no desenvolvimento de mudas de grumizameira.** Revista Brasileira Frutic., Jaboticabal - SP, Volume Especial, E. 643-648, Outubro 2011

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V.; COLOMBI, R.; PERONI, L.; GODINHO, T. O. **Estercos de origem animal em substratos para a produção de mudas florestais: atributos físicos e químicos.** Sci. For., Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 455-462, dez. 2012

VALERO, R. M.; MASTURA, E. E.; SOUZA, A. L. **Caracterização física de dois substratos orgânicos para plantas e a estimativa da umidade por meio da reflectometria no domínio do tempo.** Ciência Rural, Santa Maria, v.39, n.2, mar-abr, 2009.

van GENUCHTEN, M.Th. **A Closed – Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, 1980.

VERDONCK, O. **Reviewing and evaluation of new materials used as substrates.** Acta Horticulturae, v. 150, p. 467-473, 1983.

VIEIRA, M. A.; PAULETTO, E. A. **Avaliação de atributos físicos do substrato casca de arroz (*Oryza sativa* L.) carbonizada e tratada com polímeros hidrofílicos sintéticos.** Biosci. J., Uberlândia, v. 25, n. 1, p. 1-6. 2009

VIJAYARAGHAVAN, K.; RAJA, F. D. **Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption.** Water Research 63 (2014) p. 94-101

YOUNG, T.; CAMERON, D.D.; SORRILL, J.; EDWARDS, T. **Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance.** Urban Forestry & Urban Greening 13 (2014) p.507–516

ZORZETO, T. Q. **Caracterização física e química de substratos para plantas e sua avaliação no rendimento do morangueiro (*Fragaria x ananassa* Duch).** Dissertação. Campinas, SP, 2011.