

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Nathana Karina Swarowski Arboit

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE *Sedum rupestre* EM TELHADOS
VERDES EXTENSIVOS**

Santa Maria, RS
2017

Nathana Karina Swarowski Arboit

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE *Sedum rupestre* EM TELHADOS VERDES
EXTENSIVOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientadora: Prof^a Dr.^a Rutinéia Tassi

Santa Maria, RS, Brasil
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Swarowski Arboit, Nathana Karina
Evapotranspiração de Sedum rupestre em telhados verdes extensivos / Nathana Karina Swarowski Arboit.- 2017.
172 p.; 30 cm

Orientador: Rutineia Tassi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2017

1. Telhados verdes 2. Evapotranspiração 3. Sedum rupestre I. Tassi, Rutineia II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados à Nathana Karina Swarowski Arboit. A reprodução de partes ou o todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

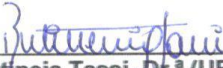
E-mail: nathanaksa@yahoo.com.br

Nathana Karina Swarowski Arboit

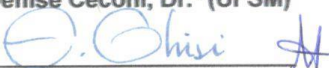
Evapotranspiração de *Sedum rupestre* em telhados verdes extensivos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 08 de Agosto de 2017:


Rutineia Tassi, Dr.^a (UFSM)
(Presidente/Orientadora)


Denise Ceconi, Dr.^a (UFSM)


EneDir Ghisi, Dr. (UFSC)
VIDEOCONFERÊNCIA

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha fortaleza;

A minha família pelo amor incondicional e por compreender minha ausência em muitos momentos;

A minha orientadora Rutinéia Tassi, pela oportunidade, ensinamentos, paciência, amizade e exemplo de conduta profissional. Serei eternamente grata por todo o tempo que dedicastes a mim;

Aos colegas do grupo de pesquisa em Ecotecnologias, em especial, à Paula, Tiago, Bruna, Maurício, Felipe, Jéssica, Gabriel e Cristiano pela ajuda nos trabalhos de campo;

Aos amigos: Gilneia, Tiago, Desirê, Samara, Gracieli, Keila, Cristiane, Stefany, Francisco, Ana Lucia, Gislayne, Joceane, Claudia e Fernanda. Obrigada pelos momentos que tivemos. Vocês tornaram essa jornada mais leve;

À empresa Maccaferri, em nome de Fábio Mendonça Bocheni e Juliano Mastella, pela doação da geomembrana drenante utilizada nos módulos experimentais. Obrigada pelo cordial tratamento e por incentivar a pesquisa científica;

Aos professores da instituição, pelos conhecimentos compartilhados e pela boa vontade em ajudar, em especial à Denise Ceconi e Angélica Durigon pelas contribuições neste trabalho;

A Rosa Maria Brito e Marília Goulart pela atenção e ajuda concedida;

Ao Luis Adolfo Berni e Dieivase Chrischon pela concepção e construção do sistema de polias;

À PROINFRA, de maneira especial à equipe de paisagismo, pelo apoio na manutenção da área experimental;

Ao LADIPP, em nome da professora Morgana Pizzolato, pela calibração da balança de pesagem;

À Universidade Federal de Santa Maria, pelo ensino público e de qualidade;

À Capes, pela bolsa de mestrado concedida;

À banca avaliadora deste trabalho pela disponibilidade e colaboração no aperfeiçoamento do mesmo.

Meu sincero muito obrigada a todos que contribuíram de alguma forma. É muito difícil transformar sentimentos em palavras, mas serei eternamente grata às pessoas que auxiliaram na condução e conclusão dessa etapa da minha trajetória acadêmica.

“Se não houver frutos, valeu a beleza das flores; se não houver flores, valeu a sombra das folhas; se não houver folhas, valeu a intenção da semente”.

Henfil

RESUMO

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE *Sedum rupestre* EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS

AUTORA: Nathana Karina Swarowski Arboit

ORIENTADORA: Rutinéia Tassi

Telhado verde é uma técnica inserida na concepção de desenvolvimento urbano de baixo impacto e comprovada em muitas pesquisas como uma medida eficiente no controle quantitativo de águas pluviais em áreas urbanizadas. A capacidade de armazenamento ou retenção das precipitações nesses sistemas, é influenciada por uma série de fatores, sendo a evapotranspiração de grande importância. Diante da carência de informações quanto à quantificação desta na parcela do balanço hídrico em telhados verdes e como forma de obter uma melhor compreensão acerca do desempenho hidrológico dos mesmos, especialmente sob as condições climáticas do Brasil, esta pesquisa teve como objetivo mensurar as taxas de evapotranspiração de parcelas de telhados verdes extensivos, vegetados com *Sedum rupestre*, comparando os valores observados com os resultantes de equações preditivas da evapotranspiração. O sistema experimental foi composto por dez módulos experimentais vegetados e não vegetados, os quais foram construídos e monitorados na Universidade Federal de Santa Maria, no período de Julho de 2016 a Fevereiro de 2017. Como resultado, verificou-se que a evapotranspiração mediana foi de 2,6 mm dia⁻¹, com valores variando de 0,2 mm dia⁻¹ a 5,1 mm dia⁻¹, a evaporação mediana do período de estudo foi de 1,9 mm dia⁻¹, com variações de 0,1 mm dia⁻¹ a 9,5 mm dia⁻¹. Foram observadas maiores taxas de evapotranspiração no verão (3,0 mm dia⁻¹), seguido pelo inverno (2,3 mm dia⁻¹) e primavera (1,8 mm dia⁻¹); para a evaporação esses valores foram de 4,3 mm dia⁻¹ (verão), 1,9 mm dia⁻¹ (inverno) e 1,0 mm dia⁻¹ (primavera). Em termos percentuais, os maiores volumes totais evapotranspirados (em relação à chuva) foram observados em Julho (49,0%), Setembro (87,1%) e Dezembro de 2016 (92,9%). Na análise sazonal, 49,8% do que choveu no inverno retornou à atmosfera sob a forma de evapotranspiração, enquanto que na primavera e verão estes valores foram de 25,0% e 29,9%, respectivamente. Módulos vegetados e não vegetados tiveram desempenho semelhante quanto ao controle do escoamento, com valores de coeficiente de escoamento de 0,47 e 0,43, respectivamente. Os resultados da pesquisa mostram que o coeficiente de cultura (K_c) e de estresse hídrico (K_s) médio foi de 0,9, com variação média mensal de 0,5-1,4 e 0,7-1,1, respectivamente. Ambos os coeficientes são variáveis em função da fase de desenvolvimento da vegetação e das condições ambientais. Foi avaliada a capacidade de equações clássicas serem usadas na estimativa da evapotranspiração, sendo testados oito modelos. Na análise diária, as equações de Penman-Monteith-FAO56, Penman, Jensen-Haise e Turc apresentaram resultados razoáveis sem a incorporação de K_c e K_s aos valores de evapotranspiração de referência. No entanto, bons ajustes só foram observados em alguns períodos. Quando as equações foram corrigidas com os coeficientes K_c e K_s , os ajustes tornaram-se substancialmente melhores, sendo que os modelos de Penman, Slatyer-McIlroy e Priestley-Taylor apresentaram ótimos resultados para todos os períodos analisados. Também foram desenvolvidos modelos de regressão, a partir das variáveis climatológicas observadas durante o estudo, sendo que os mesmos apresentaram bons ajustes em apenas alguns períodos, e a umidade relativa do ar se destacou como um fator explicativo importante da evapotranspiração. Este trabalho apresenta importantes contribuições quanto ao comportamento da evapotranspiração em telhados verdes e serve como estímulo para o desenvolvimento de outras pesquisas na área, sobretudo no Brasil, visando uma melhor compreensão da técnica e, conseqüentemente, sua difusão.

Palavras-chave: Gestão de águas pluviais. Coberturas vegetadas. Evaporação. Equações preditivas.

ABSTRACT

EVAPOTRANSPIRATION OF *Sedum rupestre* IN EXTENSIVE GREEN ROOFS

AUTHOR: Nathana Karina Swarowski Arboit

ADVISOR: Rutinéia Tassi

Green roof is a technique embedded in the design of Low Impact Development with recognized in the quantitative stormwater control in urbanized areas. The green roofs storage capacity is affected by several factors, being evapotranspiration one of the most important. Due to the lack of information related to green roofs evapotranspiration or even the role of this component in the water balance in these systems, this research was developed aiming to evaluate evapotranspiration rates of experimental extensive green roofs, vegetated with *Sedum rupestre*. The experiments were performed in subtropical Brazilian climatic conditions, and the observed values were compared to those resulting from typical predictive equations of evapotranspiration. The experiment was composed by six modular vegetated green roofs and four non-vegetated, installed and monitored at the Federal University of Santa Maria from July 2016 to February 2017. As a result, the median evapotranspiration was 2.6 mm day^{-1} , with values ranging from 0.2 mm day^{-1} to 5.1 mm day^{-1} ; the median evaporation of the study period was 1.9 mm day^{-1} , with values ranging from 0.1 mm day^{-1} to 9.5 mm day^{-1} . Higher evapotranspiration rates were observed in summer (3.0 mm day^{-1}), followed by winter (2.3 mm day^{-1}) and spring (1.8 mm day^{-1}), while evaporation, these values were 4.3 mm day^{-1} (summer), 1.9 mm day^{-1} (winter) and 1.0 mm day^{-1} (spring). In percentage terms, the highest total evapotranspiration loss (in relation to rainfall) were observed in July (49.0%), September (87.1%) and December 2016 (92.9%). Considering seasonal analysis, 49.8% of the winter returned to atmosphere as evapotranspiration, while in the spring and summer these values were 25.0% and 29.9%, respectively. Vegetated and non-vegetated modules had similar performance regarding flow control, with runoff coefficient of 0.47 and 0.43, respectively. The results of the research show that the average crop coefficient (K_c) and water stress coefficient (K_s) was 0.9, with an average monthly variation of 0.5-1.4 and 0.7-1.1, respectively, highly dependent on the stage of vegetation development and environmental conditions. In order to evaluate the ability of predicting evapotranspiration using classical equations, eight models were tested. Equations of Penman-Monteith-FAO56, Penman, Jensen-Haise and Turc equations presented reasonable daily results without including K_c and K_s to the reference evapotranspiration values. However, good adjustments were only observed in some periods. By adding the K_c and K_s coefficient to the predicted evapotranspiration values, the adjustments became substantially better, and the models of Penman, Slatyer-McIlroy and Priestley-Taylor presented excellent results for all periods analyzed. Regression models based on climatological variables observed during the study were also development, which showed good adjustments only in few periods, and the relative humidity of the air stood out as an important explanatory factor of evapotranspiration. This work presents important contributions on the behavior of green roof's evapotranspiration and serves as a stimulus for the development of complementary surveys, aiming at a better understanding of the technique and, consequently, its diffusion, especially in Brazil.

Keywords: Stormwater management. Vegetable coverings. Evaporation. Predictive equations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico global.....	29
Figura 2 - Vilarejo de L'Anseaux Meadows – Canadá. Vestígio arquitetônico do povo viking.....	36
Figura 3 - Principais componentes de um telhado verde.....	37
Figura 4 - (a) resposta do escoamento gerado a partir da precipitação. (b) processos hidrológicos em telhados verdes.....	41
Figura 5 - Materiais utilizados na construção do conjunto experimental. (a) bandeja de polipropileno, dreno, manta geotêxtil e geomembrana drenante. (b) substrato. (c) espécie vegetal Sedum rupestre. (d) bombona para coleta da água escoada dos módulos.....	57
Figura 6 - (a) balança eletrônica para pesagem dos módulos. (b) material utilizado na quantificação da água escoada dos módulos. (c) pluviômetro instalado no local para registro das precipitações.....	58
Figura 7 - (a) conjunto experimental instalado com a identificação dos módulos. (b) sistema de polias para a suspensão dos módulos.....	59
Figura 8 - Rotina de pesagem dos módulos. (a) retirada dos drenos das bombonas e vedação do orifício de saída da mangueira. (b) transporte dos módulos até a balança. (c) pesagem dos módulos.....	61
Figura 9 - Irrigação dos módulos experimentais (MV1, MV3, MV5, MNV1, MNV3) sobre a balança de pesagem.....	62
Figura 10 - Comportamento das precipitações, das taxas de evapotranspiração e evaporação ao longo do período monitorado.....	68
Figura 11 - Decaimento da evapotranspiração e evaporação ao longo de 14 dias secos consecutivos, observados entre o final de Setembro e início de Outubro de 2016...70	70
Figura 12 - Variabilidade dos valores de evapotranspiração e evaporação para cada mês monitorado.....	72
Figura 13 - Aspecto da vegetação ao longo do período de estudo. (a) fase inicial (Agosto). (b) fase de floração (Setembro-Outubro). (c) fase de senescência (Novembro). (d) fase final (Janeiro-Fevereiro).....	74
Figura 14 - Distribuição dos valores de evapotranspiração e evaporação diários para cada estação do ano monitorada.....	76
Figura 15 - Comportamento das precipitações, da evapotranspiração e evaporação nos meses monitorados, normal climatológica de precipitação e número de dias com chuva (n).....	78
Figura 16 - Acumulados de chuva e de evapotranspiração e evaporação para as estações do ano.....	79
Figura 17 - Módulos experimentais de telhados verdes extensivos instalados.....	93
Figura 18 - Mudança no aspecto da Sedum rupestre durante os meses de estudo. (a) Julho. (b) Agosto. (c) Setembro. (d) Outubro. (e) Novembro. (f) Dezembro. (g) Janeiro e Fevereiro. (h-i) Destaque para a ausência de folhas no prolongamento do caule.....	101
Figura 19-Evapotranspiração sob condições não padrão medida vs evapotranspiração estimada.....	104
Figura 20-Evapotranspiração sob condições padrão medida vs evapotranspiração estimada.....	105
Figura 21 - Valores de K_c diários observados durante o monitoramento.....	107
Figura 22 - Valores de K_s diários observados durante o monitoramento.....	109
Figura 23 - Comportamento de K_c e K_s médio mensal e sazonal.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização climática para os meses de Julho a Dezembro de 2016 e Janeiro e Fevereiro de 2017.....	65
Tabela 2 - Caracterização climática para as estações do ano monitoradas.	66
Tabela 3 - Número de dias com dados válidos para os meses de Julho a Dezembro de 2016, Janeiro e Fevereiro de 2017 e para as estações de inverno, primavera e verão.	67
Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados de evapotranspiração e evaporação observados.....	71
Tabela 5 - Estatística descritiva dos dados de evapotranspiração sob condições padrão e não padrão.	100
Tabela 6 - Equações de regressão geradas para a predição da evapotranspiração em condições não padrão.	103
Tabela 7 - Equações de regressão geradas para a predição da evapotranspiração em condições padrão.	105
Tabela 8 - Estatística descritiva para os coeficientes K_c e K_s	106
Tabela 9 - Resultado dos ajustes entre as taxas de evapotranspiração observadas e as estimadas.	110
Tabela 10 - Comparação entre ET_{c-adj} vs ET_0 corrigida com K_c e K_s	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo das taxas de evapotranspiração observadas em diferentes estudos com telhados verdes.....	47
Quadro 2 - Variáveis climatológicas utilizadas e características dos instrumentos de medição.....	63
Quadro 3 - Equações clássicas de estimativa da evapotranspiração de referência testadas.....	96
Quadro 4 - Resultado das correlações entre a evapotranspiração com as variáveis climatológicas, onde M e F significa correlação moderada e forte, respectivamente.	102

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área
a_1	Fator de umidade relativa da equação de Turc
C	Coeficiente de escoamento
CAM	Crassulacean Acid Metabolism
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior
cm	Centímetros
C_p	Calor específico
CV	Capacidade de vaso
D	Duração do período
DBI	Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto
DP	Perdas por percolação
E_a	Termo referente ao poder de secagem do ar
e_a	Pressão de vapor real
EFB	European Federation of Green Roof Association
EPA	Environmental Protection Agency
e_s	Pressão de vapor de saturação
ET	Evapotranspiração
ET_0	Evapotranspiração de referência
ET_c	Evapotranspiração da cultura sob condições padrão
ET_{c-adj}	Evapotranspiração da cultura sob condições não padrão
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
EV	Evaporação
FAO	Food and Agriculture Organization
G	Fluxo de calor da superfície do solo
GW	Movimento da água subterrânea na coluna do solo
I	Irrigação
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
K	Fator de ajuste da equação de Camargo
K_c	Coeficiente de cultura
Kg	Quilogramas
Km	Quilômetros
K_s	Coeficiente de estresse hídrico
L	Litros
LADIPP	Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos
LID	Low impact development
m	Metros
m^2	Metros quadrado
MAC	Metabolismo ácido crassuláceo
MJ	Mega Joule
mL	Mililitros
mm	Milímetros
$mm\ d^{-1}$	Milímetros por dia
MNV	Módulos não vegetados
MV	Módulos vegetados

n	Número de dias com chuva
°C	Graus celsius
P	Precipitação ou irrigação
PROINFRA	Pró-Reitoria de Infraestrutura
Q _r e D _r	Drenagem ou escoamento
R ²	Coeficiente de determinação
R _a	Radiação extraterrestre
Rad	Radiação
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
R _n	Saldo de radiação
R _s	Radiação solar global
RS	Rio Grande do Sul
s	Segundos
T	Temperatura
T _a	Temperatura média anual
u ₂	Velocidade do vento
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UKAS	United kingdom accreditation service
UNESCO	United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization
UR	Umidade relativa
UTC	Tempo universal coordenado
V _v	Velocidade do vento
W _i	Peso inicial dos módulos
W _{i-1}	Peso final dos módulos
Z _s	Profundidade do solo
Δe	Déficit de vapor
ΔS	Mudança no armazenamento de água
ΔΘ	Mudança no conteúdo de umidade no solo
λ	Calor latente de vaporização
ρ	Coeficiente de correlação de Spearman
%	Porcentagem
γ	Constante psicométrica
Δ	Declividade da curva de vapor de saturação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	27
1.1.1 Objetivo geral	27
1.1.2 Objetivos específicos.....	27
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	28
2 REVISÃO DE LITERATURA	29
2.1 CICLO HIDROLÓGICO	29
2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	32
2.3 TELHADOS VERDES: ASPECTOS GERAIS	35
2.3.1 Composição estrutural, classificação e benefícios	37
2.4.1 Atuação das plantas e do substrato no comportamento hidrológico dos telhados verdes extensivos	41
2.5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADOS VERDES	44
CAPÍTULO I – QUANTIFICAÇÃO DAS TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS VEGETADOS COM <i>Sedum rupestre</i>	49
1 INTRODUÇÃO	53
2 MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1 MÓDULOS EXPERIMENTAIS	55
2.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	57
2.3 MONITORAMENTO EXPERIMENTAL.....	58
2.3.1 Calibração da balança	60
2.3.2 Rotina de monitoramento	60
2.3.3. Obtenção das variáveis climatológicas	63
2.3.4 Tratamento e análise dos dados	64
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DO PERÍODO DE MONITORAMENTO	65
3.2 COMPORTAMENTO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO	67
3.2.1 Taxas de evapotranspiração e evaporação diárias	67
3.2.2 Evapotranspiração e evaporação mensal e sazonal	77
4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	80
REFERÊNCIAS	83
CAPÍTULO II – PREDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS VEGETADOS COM <i>Sedum rupestre</i>	87
1 INTRODUÇÃO	91
2 MATERIAL E MÉTODOS	93
2.1 QUANTIFICAÇÃO DAS TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIAS ..	93
2.2 PREDIÇÃO DAS TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIAS COM BASE NAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS E EM EQUAÇÕES EMPÍRICAS.....	95
2.3 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CULTURA E DE ESTRESSE HÍDRICO	97
2.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS	98
2.4.1 Evapotranspiração diária observada	98
2.4.2 Equações preditivas da evapotranspiração	98
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
3.1 TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIAS	100
3.2 PREDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM BASE EM EQUAÇÕES DE REGRESSÃO COM VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS.....	102

3.3 COEFICIENTE DE CULTURA E DE ESTRESSE HÍDRICO	106
3.4 PREDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM BASE EM EQUAÇÕES CLÁSSICAS DE ESTIMATIVA	109
REFERÊNCIAS	115
3 CONCLUSÃO GERAL	119
4 RECOMENDAÇÕES GERAIS	121
REFERÊNCIAS GERAIS	123
APÊNDICES.....	131

1 INTRODUÇÃO

A tendência de aumento dos espaços urbanos remete à retirada da cobertura vegetal e à compactação do solo para a implantação de edificações, ruas, calçadas e estacionamentos, descaracterizando o estado natural das bacias hidrográficas. A implicação direta da urbanização é a impermeabilização das superfícies, sendo que esta transformação do meio é capaz de alterar, sobretudo, os componentes do ciclo hidrológico (GAROTTI, 2008).

Com o solo impermeabilizado ocorre um direcionamento maior da água da chuva a um escoamento superficial em função da redução da interceptação vegetal, infiltração e evapotranspiração (CASTRO, 2011). Uma das consequências disso é o aumento nos volumes de chuva escoados, a redução do tempo de concentração e, portanto, hidrogramas de cheias mais críticos (TUCCI, 2000; OHNUMA JÚNIOR, 2008; PINTO, 2011).

Como forma de minimizar os efeitos negativos da urbanização sobre o meio ambiente e, conseqüentemente, na qualidade de vida da população, novas estratégias de gerenciamento de águas pluviais vêm sendo desenvolvidas. As técnicas atuais incorporam o conceito de sustentabilidade na drenagem urbana ao empregar princípios de preservação da paisagem natural, evitando a impermeabilização das superfícies e tratando as águas pluviais como recurso e não como um produto ou resíduo (EPA, 2000).

O sistema que mais avançou neste sentido foi a abordagem americana de “*Low Impact Development*” - LID - conhecido no Brasil como Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto - DBI (SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012). O objetivo principal do DBI é imitar a hidrologia de pré-desenvolvimento de um determinado local usando técnicas de infiltração, armazenamento, filtração, evapotranspiração e retenção do escoamento na fonte (URBAN DESIGN TOOLS, 2015).

Os telhados verdes, coberturas vegetadas ou biotelhados são uma das aplicações do DBI (DONALDSON, 2009). De maneira geral, estruturalmente, os telhados verdes são constituídos por um material de drenagem, um filtro geotêxtil, uma camada de substrato e a camada de vegetação (BERNDTSSON, 2010). Cada camada cumpre uma função e o conjunto promove benefícios como: diminuição da

demanda de energia para aquecimento e resfriamento de ambientes, redução da ilha-de-calor-urbano, isolamento acústico, melhoria da qualidade do ar e da água, aumento da biodiversidade no meio urbano e criação de espaços de lazer (CURRIE e BASS, 2010; BIANCHINI e HEWAGE, 2012).

Um benefício de destaque com relação aos telhados verdes telhados verdes e tema de interesse em várias pesquisas é o controle quantitativo do escoamento pluvial (KRISHNAN e AHMAD, 2014). Os telhados verdes têm o potencial de reduzir a quantidade de água escoada em comparação aos telhados convencionais (STOVIN, 2010) porque ao incidir sobre o telhado vegetado, a chuva pode ser interceptada pelas folhas, retida e evaporada a partir do substrato ou transpirada pelas plantas (LANG, 2010; POE, STOVIN e BERRETTA, 2015).

A evaporação do substrato associada à transpiração das plantas, isto é, a evapotranspiração (ET), é um importante mecanismo de recuperação da capacidade de retenção de água pelo substrato e reflete no desempenho hidrológico dos telhados verdes (VANWOERT et al., 2005; VOYDE et al., 2010; BERRETTA, POE e STOVIN, 2014).

Até o presente momento, poucas pesquisas têm se dedicado à compreensão da evapotranspiração em coberturas vegetadas (REZAEI, 2005; BERGHAGE et al., 2007; VOYDE, 2011; FELLER, 2011; SCHNEIDER, WADZUK e TRAVER, 2011; DIGIOVANNI et al., 2013; WADZUK et al., 2013; BERRETTA, POE e STOVIN, 2014; POE, STOVIN e BERRETTA, 2015; CARBONE et al., 2016). Nesses poucos estudos, desenvolvidos principalmente em países da Europa e nos Estados Unidos, os autores determinaram essa parcela do balanço hídrico em telhados verdes a partir de lisímetros de pesagem, sob condições climatológicas controladas ou reais e tentaram modelar os dados observados com base em equações clássicas de estimativa da evapotranspiração.

De um modo geral, as pesquisas reconhecem a aplicabilidade dos telhados verdes como uma ferramenta inovadora na gestão das águas pluviais urbanas, porém apenas quando as taxas de evapotranspiração tiverem sido mensuradas e modeladas é que o impacto dos mesmos poderá ser avaliado e previsto (REZAEI, 2005). Ademais, a partir de um esclarecimento mais minucioso dos processos hidrológicos que ocorrem em telhados verdes é que a técnica poderá ser aperfeiçoada e adaptada para diferentes condições climatológicas (FELLER, TRAVER e WADZUK, 2010; MARASCO et al., 2014).

Tendo em vista que a evapotranspiração é um componente de influência no controle do escoamento pluvial em telhados verdes e dada a necessidade de elucidar o comportamento hidrológico dos mesmos, especialmente sob as condições climáticas do Brasil, acredita-se ser fundamental, o desenvolvimento de pesquisas na área para que, a partir disso, seja possível esclarecer, aperfeiçoar e incentivar a implantação desses sistemas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi mensurar a evapotranspiração sob condições padrão e não padrão ocorrida em módulos experimentais de telhados verdes extensivos, vegetados com *Sedum rupestre* e localizados em região de clima subtropical brasileiro.

1.1.2 Objetivos específicos

- i) Quantificar a evapotranspiração diária sob condições padrão e não padrão em módulos experimentais vegetados, bem como a evaporação dos módulos não vegetados, relacionando as perdas de água com as condições ambientais do local de estudo;
- ii) Estabelecer modelos de predição da evapotranspiração em telhados verdes com base nas seguintes variáveis climatológicas: temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e déficit de vapor;
- iii) Identificar entre as equações clássicas de estimativa da evapotranspiração, aquelas mais adequadas, se houver, para descrever o fenômeno físico-fisiológico observado;
- iv) Determinar o coeficiente de cultura para a *Sedum rupestre* e o coeficiente de estresse hídrico ou fator de umidade no substrato.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em cinco grandes itens. Eles incluem a Introdução, a Revisão de Literatura, os Capítulos I e II e as Considerações Finais.

A Introdução descreve, de maneira sucinta, a problemática da gestão das águas pluviais no meio urbano e a inserção de telhados verdes como medida mitigadora dos impactos atrelados à urbanização, com enfoque no controle do escoamento e a atuação da evapotranspiração nesse processo.

A Revisão de Literatura aborda temas relevantes para o entendimento geral da pesquisa, tais como: ciclo hidrológico, com ênfase na parcela de evapotranspiração, abordando os conceitos, processos e métodos de determinação deste componente; aspectos gerais sobre os telhados verdes (composição estrutural, classificação e benefícios) e comportamento hidrológico dos mesmos. Por fim, é apresentada uma síntese dos resultados de algumas pesquisas que investigaram as taxas de evapotranspiração ocorridas em coberturas vegetadas.

Os dois itens seguintes assumem um caráter de artigo e refletem no produto desta pesquisa, sendo que o Capítulo I trata do comportamento da evapotranspiração frente aos seguintes fatores: variáveis climatológicas, disponibilidade de água na camada de substrato e fases de desenvolvimento da vegetação.

O Capítulo II, por sua vez, apresenta os resultados referentes à comparação das taxas de evapotranspiração sob condições padrão e não padrão medidas com os valores estimados por meio de equações clássicas de predição da evapotranspiração e de modelos de regressão gerados com base nas variáveis climatológicas observadas no período de estudo. Cada um dos capítulos, é estruturado em: Introdução; Material e Métodos; Resultados e Discussão; Conclusão e Recomendações.

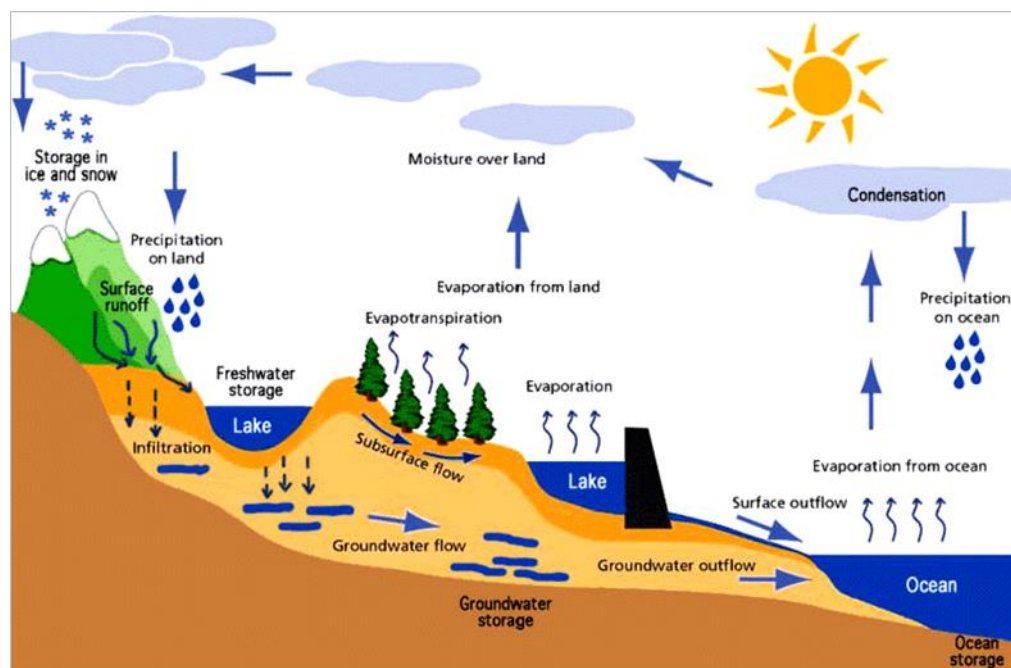
O último item desse trabalho tece as considerações finais e também recomendações a respeito dos resultados obtidos nos Capítulos I e II.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

A circulação contínua, e a distribuição da água sobre a superfície da terra, subsolo, oceanos e atmosfera é conhecida como ciclo hidrológico ou ciclo da água; esse é um conceito central da hidrologia, e é composto pelos processos apresentados na Figura 1. A dinâmica do ciclo é governada pela radiação solar, força gravitacional e rotação da Terra (TUCCI e MENDES, 2006). A quantidade de água e a velocidade com que ela circula nas diferentes fases do ciclo hidrológico é influenciada por fatores como cobertura vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia (CARVALHO e SILVA, 2006).

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico global.



Fonte: Uvo (2011)

A energia solar, ao impulsionar o ciclo hidrológico, permite que a água presente no continente e nos oceanos seja evaporada e armazenada, temporariamente, na atmosfera. Além da evaporação direta das superfícies líquidas, a transpiração vegetal também proporciona o ingresso de vapor à atmosfera (MARTIN, 2008).

Sob circunstâncias específicas, o vapor do ar atmosférico se condensa e a água retorna à superfície na forma de chuva. Parte da precipitação incidente é interceptada pelas folhas e caules da vegetação ficando disponível para evaporar. A água que atinge o solo pode infiltrar, evaporar ou escoar superficialmente até um corpo d'água. A parcela infiltrada irá umedecer o solo, alimentar os aquíferos e criar o fluxo de água subterrânea, que tende a migrar para os oceanos (TUCCI e MENDES, 2006; COLLISCHONN e TASSI, 2008).

Se considerado em escala global, o ciclo hidrológico acontece de forma fechada. Porém, em escala regional podem ocorrer alguns subciclos, em que a água evaporada de um rio, por exemplo, precipita-se novamente sobre este antes de retornar ao oceano (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Como os componentes do ciclo hidrológico apresentam variabilidade temporal e espacial, a mensuração quantitativa dos mesmos é de suma importância no desenvolvimento das atividades humanas, como por exemplo, na concepção de projetos de engenharia e na gestão e planejamento de recursos hídricos (GUANDIQUE e MORAIS, 2015).

Dentro do ciclo hidrológico, a evaporação (EV) é o processo físico pelo qual ocorre a transferência de água do estado líquido para o gasoso (PAZ, 2004). Essa mudança de estado da água pode acontecer diretamente das superfícies de água livre (rios, lagos, represas e oceanos), dos solos e da água interceptada pela vegetação, como também pela transpiração das plantas (SENTELHAS e ANGELOCCI, 2009). Na prática, a evaporação e a transpiração são combinadas em um único termo denominado evapotranspiração em virtude da dificuldade de se distinguir os dois processos, já que os mesmos ocorrem simultaneamente (FELLER, 2011).

Quando no estado líquido, a água mantém seu volume devido às forças de atração entre as moléculas. Para escapar à atmosfera sob a forma de vapor, é necessário que essa ligação seja rompida demandando uma grande quantidade de energia, a qual é chamada de calor latente de evaporação. Na natureza essa energia é provida pela radiação solar (MARTIN, 2008; MIRANDA, OLIVEIRA e SILVA, 2010).

A quantidade de vapor de água na atmosfera é limitada e sua concentração máxima é denominada de concentração de saturação ou pressão de vapor de saturação, a qual varia conforme a temperatura do ar (SILVEIRA, 2014). Temperaturas mais elevadas conduzem a um aumento na pressão de saturação e, conseqüentemente, a capacidade de armazenamento de água pela atmosfera torna-

se maior (SOUZA, 2013). Contudo, quando o ar acima de uma superfície evaporante está saturado de vapor, o fluxo de evaporação se encerra mesmo que a radiação solar esteja fornecendo a energia do calor latente de evaporação (COLLISCHONN e TASSI, 2008). Deste modo, para que o processo aconteça é necessário que a água esteja recebendo energia e que o ar acima da superfície líquida não esteja saturado (COLLISCHONN e TASSI, 2008). O vento tem um papel fundamental na renovação do ar circundante sobre a superfície de evaporação, à medida em que promove o afastamento de massas de ar úmidas e as substitui por ar mais seco (ALLEN et al., 1998).

A vegetação utiliza a umidade do solo tanto para o seu crescimento como para o metabolismo. Por meio do sistema de raízes a água é extraída do solo e se move até as folhas através de vasos condutores denominados xilemas (PERUCHI, 2009). Na superfície das folhas, os estômatos, estruturas de comunicação entre a parte interna da planta e a atmosfera vaporizam a água para o meio externo (FELLER, 2011). A força motriz para o movimento da água dentro da vegetação é o diferencial de pressão entre a água presente no tecido da planta e o ar seco externo (BERGHAGE et al., 2007).

Deste modo, fica claro que o processo de evapotranspiração depende de uma série de fatores atrelados às condições climatológicas, tais como radiação solar, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento (PERUCHI, 2009). Além disso, características do sistema evaporante, como pureza da água, textura e estrutura do solo, disponibilidade hídrica, altura das plantas, área foliar, albedo e profundidade de raízes também são fatores intervenientes (SENTELHAS e ANGELOCCI, 2009).

Na literatura são apresentados diferentes conceitos para tratar da evapotranspiração, porém, Allen et al. (1998) reconhece como padrão os seguintes termos e definições:

- Evapotranspiração da cultura de referência (ET_0): corresponde à taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência, normalmente a grama, sem limitação de água no solo e com altura uniforme de 0,12 m, resistência de superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. Por se tratar de uma superfície vegetada hipotética, os únicos fatores que podem influenciar na perda de água são os climatológicos. Deste modo, a ET_0 expressa o poder evaporativo da atmosfera;

- Evapotranspiração sob condições padrão (ET_c): é a evapotranspiração de uma cultura qualquer, livre de doenças, bem fertilizada, cultivada em grandes campos,

sob condições ótimas de umidade do solo e com plena produção sob dadas condições climáticas. Sendo a ET_c função do tipo e do período de crescimento da cultura, é possível estabelecer uma relação entre ET_0 e ET_c . Essa relação é dada por um coeficiente adimensional, chamado de coeficiente de cultura (K_c), o qual é obtido experimentalmente para cada cultura. Assim, conforme a equação 1, multiplicando a ET_0 pelo K_c , a ET_c é determinada.

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

- Evapotranspiração sob condições não padrão (ET_{c-adj}): é a evapotranspiração de uma cultura qualquer, sob manejo e condições ambientais que diferem das condições padrão. Em condições de campo, a ET_{c-adj} pode se afastar da ET_c em função da presença de pragas e doenças, baixa fertilidade do solo, escassez de água ou encharcamento. Isso pode resultar em baixo crescimento e densidade da vegetação, além de reduzir a evapotranspiração abaixo da ET_c . A ET_{c-adj} é determinada pela equação 2, que além de incluir o K_c , leva em consideração também um coeficiente de estresse hídrico (K_s).

$$ET_{c-adj} = K_s \times K_c \times ET_0 \quad (2)$$

Para Tucci (2000), dos componentes do ciclo hidrológico, a evaporação e a evapotranspiração são as parcelas que apresentam maior dificuldade de determinação em função de ser um processo complexo e dinâmico, que envolve fatores bióticos e abióticos.

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Quantitativamente a evapotranspiração pode ser determinada diretamente por meio de experimentos ou por equações de estimativa baseadas em princípios físico-fisiológicos ou no empirismo (BERLATO e MOLION, 1981; VOYDE, 2011).

Quanto às equações de predição da evapotranspiração, a concepção das mesmas se deu com base em cultivos agrícolas, os quais são caracterizados por superfícies homogêneas, extensas e irrigadas e, portanto, a aplicabilidade em

telhados verdes deve ser melhor investigada já que as condições entre esses dois sistemas são bastante diferentes (VOYDE, 2011).

Empregando modelos de predição da evapotranspiração de culturas agrícolas, alguns trabalhos investigaram se aqueles eram capazes de explicar a evapotranspiração ocorrida em telhados verdes. Feller (2011) testou os modelos de Penman, Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Slatyer-McIlroy. Voyde (2011) utilizou os métodos de Blaney-Criddle-FAO24, Hargreaves, Penman, Kimberly-Penman, Penman-FAO24, Penman-Monteith e Penman-Monteith-FAO56. Schneider (2011) comparou os resultados obtidos em lísimetros de pesagem com a equação de Penman-Monteith, enquanto que Wadzuk et al. (2013) avaliaram as equações de Blaney-Criddle, Hargreaves, Slatyer-McIlroy, Priestley-Taylor e Penman-Monteith. Nestes estudos, as equações de predição de Penman-Monteith, Blaney-Criddle, Penman, e Penman-Monteith-FAO56 apresentaram as melhores performances. No entanto, há pouco consenso sobre qual seria o modelo mais adequado para usar e se realmente é apropriado empregar equações com base nos pressupostos agrícolas (VOYDE, 2010).

Dessa forma, os métodos diretos ganham uma grande importância, pois servem de calibração para as equações de predição ao determinar a evapotranspiração em campo (SOUZA, 2011).

A lisimetria, caracterizada como método direto, é conhecida há 300 anos e emprega tanques enterrados, abertos na parte superior, preenchidos com solo e vegetados com a cultura que se quer conhecer a evapotranspiração (FELTRIN, 2009).

Feltrin (2009) classifica os lisímetros em duas categorias conforme seu mecanismo de funcionamento: lisímetros de pesagem (mecânica, eletrônica, hidráulica e de flutuação) e lisímetros não pesáveis (drenagem e compensação com lençol freático constante).

No caso dos lisímetros de pesagem, os tanques são colocados, normalmente, sobre células de carga e conectados a um datalogger que registra a mudança de peso ocorrida (BERGHAGE et al., 2007). A alteração do peso do sistema é equiparada à evapotranspiração (FELLER, 2011; DIGIOVANNI, 2013). Juntamente com o lisímetro as variáveis hidrológicas precipitação e escoamento são monitoradas (TUCCI, 1997). Assim sendo, a evapotranspiração utilizando a lisimetria de pesagem é obtida por um balanço hídrico.

Se considerada uma porção ou um volume isolado de solo, o balanço de água no mesmo corresponde à diferença entre a quantidade de água que entra nesse volume e a quantidade que sai dele, durante um intervalo de tempo (MOTA, 2010). A quantidade de água que entra no solo (saldo positivo) corresponde, normalmente, à precipitação ou irrigação, ao passo que as parcelas que deixam o solo (saldo negativo) são a evapotranspiração, o escoamento superficial e a percolação (MOTA, 2010).

De acordo com Schneider (2011) o balanço geral de água no solo é dado pela equação 3.

$$\Delta\theta \times Z_s = P - Q_r - ET - DP + GW \quad (3)$$

Sendo:

$\Delta\theta$: a mudança no conteúdo de umidade no solo;

Z_s : a profundidade do solo;

P : a precipitação (ou irrigação);

Q_r : o escoamento superficial;

ET : a evapotranspiração;

DP : as perdas por percolação;

GW : o movimento da água subterrânea na coluna do solo.

No caso de telhados verdes, como eles não são conectados à água subterrânea, não ocorrem os fluxos de DP e GW (SCHNEIDER, 2011). Deste modo, a equação 3 pode ser rearranjada, resultando na equação 4, evidenciando a evapotranspiração (VOYDE et al., 2010; VOYDE, 2011; SCHNEIDER, 2011; DIGIOVANNI et al., 2013; WADZUK et al., 2013), onde o último termo (ΔS) corresponde à mudança no armazenamento de água (umidade) no telhado verde, determinada pela variação de peso do lisímetro.

$$ET = P - Q_r - \Delta S \quad (4)$$

Quando em períodos secos, DiGiovanni et al. (2013) simplificam a equação 4, ao considerar a precipitação e a drenagem (escoamento) como nulos, resultando, portanto, na equação 5.

$$ET = -\Delta S \quad (5)$$

Destaca-se que a medida direta da evapotranspiração por lisimetria, embora bastante precisa, é onerosa e complexa, justificando seu uso apenas em condições experimentais (BARBOZA JÚNIOR, 2009). Como os lisímetros de pesagem são considerados o único método diretamente quantitativo para medir a evapotranspiração, os dados gerados a partir deles são tomados como verdadeiros ou reais para comparação com os resultados de outros métodos de determinação da evapotranspiração (DIGIOVANNI, 2013).

2.3 TELHADOS VERDES: ASPECTOS GERAIS

Telhados verdes são uma tecnologia emergente no Brasil, inserida na concepção do Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto que consiste, basicamente, na integração da vegetação sobre a cobertura de edificações (FASSMAN, SIMCOCK e VOYDE, 2010). A ideia de incorporar vegetação aos telhados convencionais não é recente mas, no contexto atual, uma prática antiga se tornou solução para um problema novo, isto é, os impactos socioambientais negativos atrelados à urbanização (COMPTON, 2006).

Na antiguidade, o homem já se valia de coberturas vegetadas como forma de se proteger do calor do verão e das temperaturas baixas que se manifestavam nos meses de inverno. Assim, os telhados verdes tinham como principal função propiciar o isolamento térmico (MAGILL, 2007; WILLES, 2014). No Canadá, os vikings, há cerca de 1000 anos, construíram seus abrigos utilizando coberturas de gramíneas como isolante de calor. O vilarejo de L'Anseaux Meadows, um dos locais onde viveram esses povos (Figura 2), é reconhecido desde 1978 como patrimônio mundial pela UNESCO e sua arquitetura foi restaurada como forma de preservar a história e a cultura sustentável dos vikings (YONEDA, 2014).

Na idade contemporânea, na década de 1970, durante a crise do petróleo, a Alemanha, passou a explorar a técnica para fins de conservação de energia em ambientes internos e, a partir de então, a implantação de coberturas vegetadas passou a ser incentivada. Em 2012 o país tinha uma cobertura de 86 milhões de m² de telhados verdes, sendo a cidade de Stuttgart referência na aplicação dessa tecnologia, com 2 milhões de m² (ROMO, 2012; CENTRE FOR ARCHITECTURAL ECOLOGY, 2015).

Na Europa, como forma de recuperar a qualidade de vida nas cidades, foi criada, em 1997, a European Federation of Green Roof Association (EFB) que reúne 13 países e tem por objetivo promover o uso de telhados verdes em todo continente.

No Brasil, uma pesquisa desenvolvida por Köhler e Schmidt no ano 2000, na cidade do Rio de Janeiro concluiu que o país tem um bom potencial para implantação de telhados verdes, em virtude, sobretudo, do clima, que favorece o desenvolvimento de vários tipos de plantas passíveis de utilização em coberturas vegetadas (FEIJÓ, 2006).

Figura 2 - Vilarejo de L'Anseaux Meadows – Canadá. Vestígio arquitetônico do povo viking.



Fonte: Yoneda (2014).

Uma das principais empresas brasileiras especializadas na aplicação de telhados verdes tem cerca de 500.000 m² instalados, sendo Santa Catarina e Rio Grande do Sul os estados que se destacam na implantação da técnica (FERRAZ, 2012; ECOTELHADO, 2015).

Feijó (2006) acredita que para maior adesão aos sistemas vegetados no Brasil é necessário, primeiramente, a conscientização da população, bem como o desenvolvimento de pesquisas científicas na área, a elaboração de normas técnicas específicas e o aperfeiçoamento de profissionais para projetar e aplicar esse tipo de cobertura. A falta de dados quantitativos que provem os benefícios dos telhados verdes em escala real também é uma barreira para sua implantação (FIORETTI et al., 2010).

2.3.1 Composição estrutural, classificação e benefícios

De maneira geral, quanto à composição estrutural (Figura 3), os telhados verdes apresentam quatro camadas: a vegetação, o substrato, o leito filtrante e a drenagem (BERNDTSSON, 2010; BERRETTA, POE e STOVIN, 2014). É possível ocorrer outras variações com um número maior de camadas para atender fins específicos, como a camada de isolamento de calor e anti-raízes (TOLDERLUN, 2010; JOBIM, 2013).

Figura 3 - Principais componentes de um telhado verde.



Fonte: Adaptado de Voyde (2010).

Os itens seguintes descrevem, brevemente, as características de cada camada constituinte de telhados verdes extensivos:

a) Camada de vegetação: a vegetação, além de ser a camada estética, é uma das composições fundamentais dos telhados verdes, pois é responsável por importantes benefícios socioambientais trazidos por estes sistemas (BIANCHINI e HEWAGE, 2012; LORENZINI NETO, 2013).

A cobertura vegetal dos telhados deve ser selecionada considerando, principalmente, as condições climáticas locais (GETTER e ROWE, 2008; TASSI et al., 2014). Fatores como ventos, temperaturas extremas e precipitações são determinantes para o desenvolvimento e sobrevivência das plantas (OBERNDORFER et al., 2007).

Por sua capacidade de resistir às condições desfavoráveis, especialmente ao estresse hídrico, por terem raízes curtas e propagarem rapidamente, as suculentas do gênero *Sedum*, pertencentes à família Crassulaceae, são bastante empregadas em telhados verdes (HOOVER, 2010; STARRY, 2013).

b) Camada de substrato: essa camada é constituída pela mistura de materiais orgânicos e inorgânicos (GRIFFIN, 2014), tais como solo, areia, cascalho, argila expandida, ardósia, vermiculita, escória de alto-forno, turfa e polímeros, como a poliacrilamida (AMPIM et al., 2010; YOUNG et al., 2014). Os componentes da camada de substrato de telhados verdes devem propiciar leveza e durabilidade à mesma e fornecer nutrientes à vegetação (TASSI et al., 2014).

Além de servir de suporte às plantas, a camada de substrato tem um papel crucial na retenção de água da chuva e, por consequência, no controle quantitativo das águas pluviais (BERGHAGE et al., 2007).

c) Camada filtro: disposta entre o substrato e a camada de drenagem, o material filtrante, normalmente um geotêxtil, tem a finalidade de reter as partículas lixiviadas a partir do substrato, evitando que as mesmas atinjam a camada de drenagem e provoquem sua colmatação (TASSI et al., 2014; BIANCHINI e HEWAGE, 2012).

d) Camada de drenagem: como o próprio nome sugere, essa camada tem a finalidade de drenar a água da chuva incidente sobre o sistema, de modo que não ocorra a saturação do substrato por um tempo demasiadamente longo (URBIS LIMITED, 2007). A camada de drenagem também propicia umidade ao substrato, contribuindo para a sobrevivência da vegetação em períodos de seca (TASSI et al., 2014).

Um componente para drenagem é aplicável, na maioria das vezes, em superfícies planas ou com inclinação menor que 5°, tendo em vista que quando instalado em telhados muito íngremes acabam por drenar a água mais rápido que o desejado, o que pode comprometer o desenvolvimento da vegetação e reduzir a participação da camada de drenagem no controle do escoamento (URBIS LIMITED, 2007).

Os materiais que compõem a camada de drenagem devem ser leves e finos, a exemplo do polietileno e o polipropileno, os quais são os mais indicados para as coberturas vegetadas devido ao baixo peso (MILLER, 2014).

e) Camada anti-raiz: essa camada tem o objetivo de impedir que as raízes das plantas danifiquem a estrutura da edificação e que a partir disso, vazamentos e

infiltrações sejam gerados (RAMESH, 2011). Para cumprir essa função pode-se usar membranas termoplásticas e de cobre, além de produtos químicos retardadores de raiz (BALDESSAR, 2012).

A prevenção de vazamentos é um cuidado importante em projetos de telhados verdes, pois caso estes ocorram, todas as camadas devem ser removidas para localização do problema (BIANCHINI e HEWAGE, 2012).

f) Camada de cobertura: essa estrutura deve ser projetada e construída de modo a sustentar toda a carga do telhado verde, a qual é calculada considerando o peso das plantas adultas e do substrato em condições de saturação (FERRAZ, 2012).

Jobim (2013) descreve que na composição dos telhados verdes, diferentes materiais podem ser empregados, dependendo dos objetivos do usuário, da disponibilidade de material local, da capacidade de suporte da edificação e dos custos envolvidos na implantação e manutenção do sistema.

Em se tratando de tipologia dos telhados verdes, na bibliografia, os mesmos são classificados em intensivos, semi-intensivos e extensivos dependendo, sobretudo, da profundidade do substrato, do uso desejado e dos custos de manutenção (PALLA, GNECCO e LANZA, 2010).

Telhados verdes intensivos apresentam uma espessura maior de substrato, normalmente, acima de 15 cm até 150 cm (IGRA, 2015). Em razão disso, podem comportar uma variedade maior de plantas, inclusive de grande porte, como árvores (SPEAK et al., 2013). Tendo em vista que a carga destes telhados pode variar de 200 kg m⁻² a 970 kg m⁻², a estrutura da edificação deve ser mais reforçada e assim, os custos associados à construção acabam sendo mais elevados (OBERNDORFER et al., 2007).

Os telhados extensivos, por sua vez, são caracterizados por apresentar uma profundidade da camada de substrato menor, comumente, entre 5 cm a 15 cm (LANG, 2010). A carga varia de 60 Kg m⁻² a 150 Kg m⁻² e por serem mais leves podem ser construídos sobre diversos tipos de coberturas, como telhas de cerâmica e de fibrocimento (JOBIM, 2013). Além disso, em virtude de abrigarem espécies vegetais de menor porte e menos exigentes em termos de nutrientes e necessidade de água, os telhados extensivos têm sua implantação facilitada (CARSON et al., 2013; IGRA, 2015).

Embora não muito citados na literatura, os telhados semi-intensivos são uma combinação dos intensivos e extensivos (BIANCHINI e HEWAGE, 2012). A

profundidade de substrato é de 10 cm a 20 cm e uma variedade maior de plantas em relação aos extensivos é possível (FASSMAN, SIMCOCK e VOYDE, 2011), exigindo, deste modo, uma certa periodicidade de manutenção e irrigação.

Quanto aos benefícios, IGRA (2015) descreve que os telhados verdes podem aumentar a vida útil da cobertura, reduzir os níveis de ruídos, promover o isolamento térmico de edificações e servir como espaço de lazer ou até mesmo de desenvolvimento da agricultura urbana. Além disso, essas coberturas propiciam a criação de hábitat à plantas e animais, reduzem o efeito da ilha-de-calor-urbano e os níveis de poluição atmosférica e atuam no controle quali-quantitativo de águas pluviais (BALDESSAR, 2012).

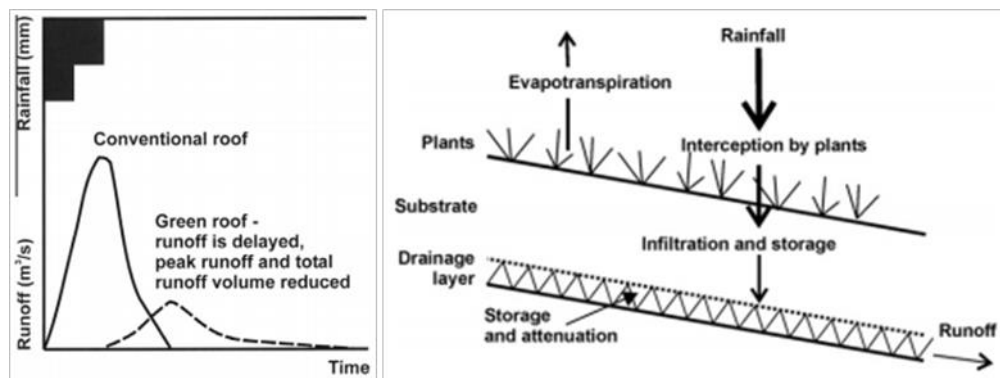
Até então, a maioria das pesquisas desenvolvidas sobre telhados verdes, têm investigado a atuação dos mesmos na gestão de águas pluviais, na conservação de energia e na revitalização de ecossistemas naturais (OBERNDORFER et al., 2007). Um número considerável de trabalhos comprova o bom desempenho dos telhados verdes no controle quantitativo do escoamento, tanto que Getter, Rowe e Andresen (2007) defendem que este é o maior serviço ambiental que a técnica pode oferecer.

2.4 COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DOS TELHADOS VERDES

Diferentemente dos telhados convencionais, as coberturas verdes oferecem uma oportunidade para reduzir e atenuar, na fonte, (Figura 4-a), o escoamento gerado pela água da chuva (STOVIN, VESUVIANO e KASMIN, 2012). Nos telhados verdes, o controle do escoamento é baseado, principalmente, na retenção e detenção a partir do substrato (CASTRO, 2011; POE, STOVIN e BERRETTA, 2015). A precipitação detida na camada de substrato é drenada no decorrer do tempo, e deste modo, ocorre um atraso no início do escoamento. A parcela retida nos poros do substrato, por sua vez, fica disponível para evaporar e para suprir as plantas, sendo que estas também podem transpirar parte da água incorporada em seus tecidos (BERNDTSSON, 2010). Além disso, a parcela de água interceptada pela vegetação é passível de evaporação, enquanto que o excesso de água do substrato é armazenado, temporariamente, na camada de drenagem ou direcionado para fora dela (STOVIN, VESUVIANO e KASMIN, 2012). A Figura 4-b ilustra os processos hidrológicos que ocorre em telhados verdes.

O comportamento hidrológico dos telhados verdes está associado a uma série de fatores, tais como evapotranspiração, condições de umidade antecedente, intensidade da chuva e propriedades hidráulicas do substrato. Neste sentido, o bom desempenho das coberturas vegetadas na gestão das águas pluviais passa pela escolha criteriosa dos componentes construtivos dos telhados, bem como pela determinação quantitativa dos fatores mencionados (SKABELUND e BROKESH, 2013)

Figura 4 - (a) resposta do escoamento gerado a partir da precipitação. (b) processos hidrológicos em telhados verdes.



Fonte: Stovin, Vesuviano e Kasmin (2012).

2.4.1 Atuação das plantas e do substrato no comportamento hidrológico dos telhados verdes extensivos

A camada vegetal e de substrato são os componentes estruturais dos telhados verdes fundamentais no controle quantitativo das águas pluviais. Durante o evento de chuva o substrato atua armazenando temporariamente os volumes de água. Após o término do evento, ou quando a capacidade máxima de armazenamento do substrato é atingida, o controle é realizado pela evapotranspiração (VANWOERT et al., 2005; VOYDE et al., 2010 e BERRETTA, POE e STOVIN, 2014). Assim, cabe à parcela de evapotranspiração recuperar o volume de armazenamento de água na camada de substrato para que as precipitações sejam retidas.

Berghage et al. (2007) descrevem que o uso da água pela vegetação depende da morfologia da mesma, sendo que plantas com uma grande superfície exposta e alta densidade de estômatos tem o potencial de usar mais água que plantas com

grande volume de tecidos em relação à área superficial, mas pouco dotadas de estômatos.

Espécies de baixo crescimento e com folhagem compacta apresentam pequena superfície exposta e, portanto, tendem a perder menos água (BERGHAGE et al., 2007). Neste sentido, à primeira vista, plantas suculentas tais como as do gênero *Sedum* parecem não ser a melhor escolha quando se deseja a recuperação da capacidade de armazenamento de água pelo substrato, pois elas são morfológica e metabolicamente adaptadas para reduzir a perda de água.

Em relação ao mecanismo fotossintético, as plantas são divididas em três grupos: plantas C₃, o qual pertencem cerca de 95% da biomassa vegetal; plantas C₄, representada principalmente pelas gramíneas; e CAM, grupo a que pertencem as suculentas (NAGASE e DUNNETT, 2012).

O *Crassulacean Acid Metabolism* (CAM) ou Metabolismo Ácido Crassuláceo (MAC) das suculentas, ao contrário das plantas C₃ e C₄, permite que as mesmas abram seus estômatos, em período de déficit hídrico, durante à noite, quando a temperatura do ar é mais amena e fechem durante o dia a fim de diminuir a perda de água (BUSALDI et al., 2013).

Nas suculentas, o dióxido de carbono absorvido através dos estômatos durante à noite é armazenado, temporariamente, como ácido málico. Este, por sua vez, se acumula nos vacúolos das folhas e aumenta a concentração osmótica, o que permite à planta absorver e armazenar água, levando à suculência observada (HOOVER, 2010).

Taiz e Zeiger (2006) descrevem que, tipicamente, uma planta CAM perde de 50 a 100 g de água para cada grama de CO₂ obtido, comparado com valores de 250 a 300 g e 400 a 500 g para plantas C₄ e C₃, respectivamente.

Muito embora as suculentas tenham a habilidade de perder pouca água, elas são as plantas mais indicadas para telhados verdes extensivos, tendo em vista que não é interessante sob o ponto de vista hidrológico e econômico que estes sistemas sejam irrigados. Além disso, uma vez que os telhados verdes são definidos como “telhados vivos” o ideal é que as plantas permaneçam vivas durante toda a vida útil do telhado, então a espécie escolhida deve oferecer resistência às condições climáticas extremas (LANG, 2010).

Como forma de investigar o potencial das plantas CAM na perda de água e, por consequência, a contribuição das mesmas na retenção de águas pluviais,

pesquisadores como Rezaei (2005) e Berghage et al. (2007) conduziram experimentos empregando diferentes espécies de suculentas e concluíram que elas transpiram rapidamente quando a água está prontamente disponível e conservam a mesma quando ocorre restrição hídrica. Desta forma, ao contrário do que se pensava, ou seja, que plantas CAM não eram ideais para telhados verdes, pois conservavam a água o tempo todo, os resultados dessas pesquisas apontam em favor do uso das suculentas em coberturas vegetadas.

Deve-se considerar, no entanto, que o efeito da vegetação na retenção é pequeno quando comparado às propriedades hidráulicas da camada de substrato (PALLA, GNECCO e LANZA, 2010), sendo que as características deste estão entre os fatores mais importantes para retenção de água pelos telhados verdes.

Embora o termo substrato seja usado para se referir ao meio de crescimento das plantas em telhados verdes, os processos físicos que envolvem a dinâmica da água nesses sistemas são os mesmos que ocorrem no solo em si.

No solo, os espaços vazios entre as partículas proporcionam armazenamento temporário da água e o teor de umidade que pode ser contido numa porção de solo depende da sua porosidade (GRIFFIN, 2014). O grau de porosidade pode variar em função do tipo de vegetação, do nível de compactação e da estrutura do solo, a qual é resultante da combinação de partículas de baixa granulometria e agregados maiores e da quantidade de material orgânico (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Assim, no caso de telhados verdes, um substrato composto principalmente de partículas grandes terá poros grandes e a água fluirá rapidamente para fora da camada de substrato. Ao contrário, um substrato composto de pequenas partículas terá poros menores e a água fluirá de maneira mais lenta (GRIFFIN, 2014).

Quando o solo está com todos seus poros completamente ocupados por água, diz-se que está saturado. Ao contrário, quando está completamente seco, seus poros estão ocupados por ar (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Quando um evento de chuva que saturou o solo cessa, a água nos macroporos e entre eles irá drenar verticalmente como resposta ao gradiente hidráulico imposto pela força da gravidade. Algumas horas após o evento chuvoso, esse movimento rápido descendente diminuirá para valores insignificantes e neste momento diz-se que o solo está na capacidade de campo. A partir disso, outras forças passarão a desempenhar um papel maior no movimento da água remanescente, a qual estará presente principalmente nos microporos (REICHARDT e TIMM, 2004).

Há duas forças principais que atuam no sentido de reter a água nos poros do solo: forças capilares e forças de adsorção. As forças capilares ocorrem como consequência da tensão superficial da água interagindo com a superfície dos microporos. As forças de adsorção estão associadas às cargas eletrostáticas atuando entre as partículas do solo e as moléculas de água ou íons presentes nela e resultam na manutenção de um filme muito fino de água sobre as partículas do solo. A essas duas forças de retenção dá-se o nome de força mátrica ou potencial mátrico (LIBARDI, 2005).

Em uma amostra de solo, a força mátrica varia com o teor de água no mesmo (REICHARDT e TIMM, 2004). Solos mais secos apresentam uma força mátrica maior e, portanto, exercem maior sucção sobre a água que solos mais úmidos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Nesse sentido, o teor de umidade dos substratos de telhados verdes imediatamente antes de um evento de chuva influencia, de maneira significativa, a retenção e detenção da água (PALLA, GNECCO e LANZA, 2010).

Bengtsson (2005) e Voyde et al. (2010) definem a capacidade de retenção de água pelo substrato em telhados verdes como a diferença entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. A capacidade de campo é a umidade verificada no solo após a saturação e drenagem livre da água e o ponto de murcha permanente é o teor de umidade no qual a planta já não pode mais extrair água (SCHNEIDER, 2011). Para Lorenzo (2010) a estrutura e textura do solo governam a capacidade de campo, o ponto de murcha e a retenção de água.

É importante salientar que a capacidade máxima de armazenamento raramente estará disponível em um solo, tendo em vista a ocorrência de alguma umidade mesmo após o ponto de murcha. Essa umidade residual também denominada de umidade higroscópica fica firmemente adsorvida nas superfícies coloidais do solo (STOVIN, VESUVIANO e KASMIN, 2012; BRADY e WEIL, 2013).

2.5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADOS VERDES

Poucas pesquisas, até o momento, investigaram a evapotranspiração em telhados verdes (VOYDE et al., 2010). Embora haja muitos métodos de predição da evapotranspiração agrícola, eles não correspondem às características e às condições a que estão submetidos os telhados verdes. DiGiovanni et al. (2013) exemplificam isso

dizendo que a estimativa da evapotranspiração de referência de uma monocultura agrícola bem suprida de água, como por exemplo a alfafa, não pode ser aplicada em telhados verdes onde ocorre diversidade de plantas e disponibilidade variável de água.

Como forma de obter uma melhor compreensão da evapotranspiração ocorrida em telhados verdes, nos últimos anos um pequeno grupo de pesquisadores têm se dedicado ao tema (DIGIOVANNI et al., 2013).

Voyde et al. (2010), na Nova Zelândia, avaliaram a variação da evapotranspiração sob condições controladas de laboratório e o comportamento das plantas ao serem submetidas às condições de estresse hídrico. As espécies empregadas foram *Sedum mexicanum* e *Disphyma australe*. Os módulos vegetados foram mais efetivos na perda de água quando comparado aos módulos sem vegetação. As duas espécies contribuíram com cerca de 50% na evapotranspiração total. Também se observa que as maiores taxas de evapotranspiração ocorreram nos primeiros 9 dias em função da maior disponibilidade de água. Após 17 dias, período de início do estresse hídrico, as taxas de evapotranspiração diminuíram e a espécie *D. australe*, a qual apresenta metabolismo C_3 , não sobreviveu. Ao contrário desta, a *S. mexicanum*, uma planta CAM, foi capaz de diminuir as taxas de evapotranspiração no período de estresse hídrico e sobreviver por mais tempo, demonstrando a vantagem de utilização das espécies CAM como cobertura de telhados verdes.

Berghage et al. (2007) investigaram o papel das plantas *Sedum* e uma mistura de *Sedum* e *Delosperma* na perda de água por evapotranspiração em pesquisa realizada na Universidade da Pensilvânia. No estudo, em ambiente fechado, foram avaliados, além de módulos não vegetados, módulos vegetados com 100% de *Sedum spurium*, 100% *Sedum sexangulare* e mistura de 80% *Delosperma nubigenum* e 20% *Sedum album*. Ao comparar as taxas de perda de água dos módulos não vegetados e vegetados, foi observado que estes últimos foram duas vezes mais eficientes na evapotranspiração quando da disponibilidade hídrica. As taxas médias diárias de evapotranspiração para *S. spurium* e *S. sexangulare* foram de 3,0 mm dia⁻¹ e 2,7 mm dia⁻¹, respectivamente, ao passo que para a mistura de *D. nubigenum* e *S. album*, os valores foram inferiores, cerca de 1,4 mm dia⁻¹. Os autores creditam essa diferença às características morfológicas das plantas e da superfície exposta destas para evapotranspirar. No inverno, em função das baixas temperaturas e da dormência das plantas, as taxas de evapotranspiração foram menores e praticamente iguais à

evaporação dos módulos não vegetados. Quanto à evapotranspiração horária, os picos maiores aconteceram nas primeiras horas da tarde. Os autores não expuseram comentários sobre isso, mas acredita-se que estes resultados estejam associados à maior radiação solar ocorrida nesse período.

Wadzuk et al. (2013) em estudo realizado em Villanova, na Pensilvânia, quantificaram a evapotranspiração anual, durante 3 anos, utilizando lisímetro de pesagem. Dos volumes anuais precipitados, as taxas de evapotranspiração foram de 68,1%, 87,8% e 72,5%, para o ano de 2009 e 2010/2011, respectivamente, demonstrando que boa parte da chuva que incidiu sobre o telhado verde foi evapotranspirada, o que sugere pequeno volume de escoamento superficial. O ano de 2009, além de ser um ano frio, apresentou os maiores volumes de chuva, com grande homogeneidade mensal, não favorecendo a evapotranspiração. Ao contrário, em 2010 e 2011 a pluviosidade foi um pouco menor e se caracterizou por ser um ano quente o que, portanto, contribuiu para perda de água. A evapotranspiração diária média foi de 3 mm e 4 mm para os anos de 2009 e 2010/2011, respectivamente.

Poe, Stovin e Berretta (2015), em Sheffield-Inglaterra, investigaram o comportamento da evapotranspiração em sistemas vegetados e não vegetados para condições de verão e primavera simuladas em laboratório. Os autores observaram que a perda por evapotranspiração foi maior no verão que na primavera, em razão das condições mais quentes de verão que induzem à evapotranspiração. Em geral, os sistemas vegetados apresentaram maiores valores de evapotranspiração comparado à evaporação dos não vegetados somente após a primeira semana. Os autores constataram que os módulos vegetados, com solos mais porosos apresentaram maior evapotranspiração. Essa característica do meio de crescimento pode ter favorecido a penetração das raízes das plantas e o acesso à água armazenada em profundidades maiores. Ao contrário do que se esperava, foi verificado que as plantas *Sedum* não aumentaram as taxas de evapotranspiração durante à noite, desafiando a hipótese de reversão do mecanismo de fotossíntese. Semelhante ao observado por Voyde et al. (2010), as taxas de evapotranspiração tenderam a decair com o tempo, mais notoriamente a partir do sétimo dia. Para a evapotranspiração diária o decaimento foi mais abrupto no verão, enquanto que na primavera as taxas tiveram um comportamento mais constante. De acordo com os autores, o decaimento da evapotranspiração ao longo do tempo é consequência da redução da disponibilidade de água no substrato.

Berretta, Poe e Stovin (2014) avaliaram durante 29 meses, sob condições de campo, o comportamento de módulos vegetados e não vegetados quanto às perdas de água. Os autores observaram uma maior perda de água inicial pelos módulos não vegetados e justificaram esse resultado em função da ausência de sombreamento e da porosidade do substrato empregado. Com o passar dos dias secos, as taxas de evapotranspiração superaram a evaporação e os autores afirmam que o efeito da vegetação é mais evidente depois de transcorridos alguns dias secos. Foram observadas taxas máximas de evapotranspiração de 4 mm dia⁻¹ e de 1 mm dia⁻¹ para as estações de verão e inverno, respectivamente.

Voyde (2011), em sua dissertação de mestrado, apresenta um resumo das taxas de evapotranspiração diárias observadas em telhados verdes estudados por alguns autores quando da disponibilidade de água e em casos de escassez hídrica (Quadro 1). Como se observa, em geral, a evapotranspiração tornou-se maior com o aumento da temperatura, porém quando no estado de déficit hídrico, as taxas foram substancialmente reduzidas. Isso reforça a ideia de que a evapotranspiração depende da oferta de água e da demanda atmosférica.

Quadro 1 - Resumo das taxas de evapotranspiração observadas em diferentes estudos com telhados verdes.

Taxas de evapotranspiração observadas em situações de disponibilidade hídrica				
Vegetação	ET diária (mm d ⁻¹)	Temperatura (°C)	Dias com disponibilidade de água	Fonte
Sedum	0,84	8 (inverno)	8	(Rezaei, 2005)
	0,78	19 (outono/primavera)	10	
	1,82	28 (verão)	6	
	2,67	31 (verão)	4	
	1,4-3,0	27	5-6	(Berghage et al., 2007b)
	2,1-5,4	21	-	(VanWoert et al., 2005b)
	0,1-0,5	4 (inverno)	-	(Köhler e Schmidt, 2008)
	0,6-1,5	18 (primavera/outono)	-	
	1,5-4,5	>22 (verão)	-	
	5-6	20 (outono)	-	
Não-sedum	3,6-66	28	Irrigado	(Wanielista et al., 2007)
	2-3	16		(Hardin e Wanielista, 2007)
Taxas de evapotranspiração observadas em situações de escassez hídrica				
Sedum	<0,5	27	10 dias	(Berghage et al., 2007b)
	0,89	27 (verão)	-	(Lazzarin et al., 2005)
	1	20 (outono)	8 dias	(DiGiovanni et al., 2010)
	0,0-0,2	>22 (verão)	-	(Köhler and Schmidt, 2008)

Fonte: Adaptado de Voyde (2011).

CAPÍTULO I – QUANTIFICAÇÃO DAS TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS VEGETADOS COM *Sedum rupestre*

RESUMO

A evapotranspiração é um fator de fundamental influência na capacidade de retenção de águas pluviais e, portanto, no desempenho hidrológico de telhados verdes. Este trabalho investigou o comportamento da evapotranspiração sob condições não padrão ou reais de cultivo e de disponibilidade hídrica, em módulos experimentais de telhados verdes extensivos. Para isso, foi instalado um experimento composto por dez módulos os quais foram pesados diariamente, sendo seis vegetados com *Sedum rupestre* e quatro não vegetados. A perda de água entre os intervalos de pesagem correspondeu às taxas de evapotranspiração e evaporação. O período de monitoramento compreendeu os meses de Julho de 2016 a Fevereiro de 2017 e os dados foram analisados na escala diária, mensal e sazonal. Como resultado, verificou-se que a evapotranspiração mediana foi de 2,6 mm dia⁻¹, com valores variando de 0,2mm dia⁻¹ a 5,1 mm dia⁻¹. A evaporação mediana para todo o período de estudo foi de 1,9 mm dia⁻¹, com variações de 0,1 mm dia⁻¹ a 9,5 mm dia⁻¹. Quanto às estações do ano, as maiores taxas de evapotranspiração foram observadas no verão (3,0 mm dia⁻¹), seguido do inverno (2,3 mm dia⁻¹) e primavera (1,8 mm dia⁻¹). Para a evaporação esses valores foram de 4,3 mm dia⁻¹ (verão), 1,9 mm dia⁻¹ (inverno) e 1,0 mm dia⁻¹ (primavera). Normalmente, após eventos chuvosos, os módulos não vegetados tiveram uma perda de água inicial maior que os módulos vegetados, possivelmente, em função da exposição direta do substrato à ação das variáveis climatológicas. No entanto, com o passar dos dias secos, as taxas de evapotranspiração se sobressaíram até o momento em que tanto evapotranspiração como evaporação foram reduzidas, ambas apresentando valores próximos de zero como consequência da redução da disponibilidade de umidade na camada de substrato. Em termos percentuais, os maiores volumes totais evapotranspirados (em relação à chuva) foram observados em Julho (49,0%), Setembro (87,1%) e Dezembro de 2016 (92,9%). Na análise sazonal, 49,8% do que choveu no inverno retornou à atmosfera sob a forma de evapotranspiração. Para a primavera e verão estes valores foram de 25,0% e 29,9%, respectivamente. Estes resultados foram influenciados pela variabilidade das condições climatológicas, pelo comportamento das precipitações e, conseqüentemente, pela disponibilidade de água na camada de substrato, além da fase de desenvolvimento da vegetação. O coeficiente de escoamento para os módulos vegetados e não vegetados foi de 0,47 e 0,43, respectivamente, o que revela que ambos tiveram desempenho semelhante no controle do escoamento pluvial, durante o período de estudo.

Palavras-chave: Retenção de água pluvial. Disponibilidade hídrica. Variáveis climatológicas. Evaporação.

CHAPTER I – QUANTIFYING OF EVAPOTRANSPIRATION RATES IN EXTENSIVE GREEN ROOFS VEGETATED WITH *Sedum rupestre*

ABSTRACT

Evapotranspiration is a factor of fundamental influence on rainwater retention capacity and, therefore, on its hydrological performance of green roofs. This work investigated the behavior of evapotranspiration under non-standard or real conditions of cultivation and water availability, in experimental modules of extensive green roofs. For this, an experiment composed by ten experimental modules was designed. Six of these modules were vegetated with *Sedum rupestre* and four without vegetated. These modules were daily weighed in order to evaluate the evapotranspiration and evaporation losses rates. The monitoring period comprised the months of July 2016 to February 2017 and the data were analyzed in the daily, monthly and seasonal scale. The median evapotranspiration rate during the monitoring period was 2.6 mm day^{-1} , with values ranging from 0.2 mm day^{-1} to 5.1 mm day^{-1} , while the median evaporation was 1.9 mm day^{-1} , with variations from 0.1 mm day^{-1} to 9.5 mm day^{-1} . Regarding the seasonal results, the highest evapotranspiration rates were observed in summer (3.0 mm day^{-1}), followed by winter (2.3 mm day^{-1}) and spring (1.8 mm day^{-1}); for evaporation, these values were 4.3 mm day^{-1} (summer), 1.9 mm day^{-1} (winter) and 1.0 mm day^{-1} (spring). Normally, after rainy events, the non-vegetated modules had higher initial water loss than the vegetated one, possibly due to the direct exposure of the substrate to the action of the climatological variables. However, along periods of consecutive dry days, the evapotranspiration rates stood out evaporation until both evapotranspiration and evaporation were reduced, reaching values close to zero due to the reduction in the substrate moisture availability. Percentually, the highest total evapotranspiration losses (in relation to rainfall) were observed in July (49.0%), September (87.1%) and December 2016 (92.9%). In the seasonal analysis, about 49.8% of rainfall became evapotranspiration; in the spring and summer, these values were 25.0% and 29.9%, respectively. These results were mainly affected by climatological variability precipitation behavior and, consequently, by the availability of water in the substrate layer, besides the stage of vegetation development. The runoff coefficient for the vegetated and non-vegetated modules was 0.47 and 0.43, respectively, which reveals that during the monitoring period both systems had similar performance in the stormwater control.

Keywords: Stormwater retention. Water availability. Climatological variables. Evaporation.

1 INTRODUÇÃO

Os telhados verdes estão emergindo como uma técnica de desenvolvimento de baixo impacto cada vez mais popular, usada para mitigar os efeitos adversos da urbanização e a perda de espaços vegetados (SIA, 2016). Estes sistemas, considerados não intrusivos (SIA, 2016), têm a importante função de imitar o ciclo hidrológico natural perdido, por meio dos processos de interceptação, infiltração e evapotranspiração (STOVIN, VESUVIANO e KASMIN, 2012).

A evapotranspiração (ET) é fundamental no desempenho hidrológico dos telhados verdes, pois é responsável pelo volume de armazenamento de água disponível no substrato entre os eventos de chuva (VOYDE et al., 2010). Assim esse componente do balanço hídrico está diretamente associado à capacidade dos telhados verdes em reter e atenuar o escoamento das águas pluviais (SIA, 2016).

Como em qualquer outra superfície vegetada, a perda de água para a atmosfera em telhados verdes depende de uma série de fatores, sendo um deles o clima (SIA, 2016). Desta forma, variáveis climatológicas como temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento interagem entre si e regem as taxas de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

Não é apenas a demanda atmosférica que possibilita a ocorrência do processo de evapotranspiração, a oferta ou disponibilidade de água no sistema é uma condição imprescindível e, à medida em que o teor de umidade no substrato diminui, ao longo de períodos secos, a evapotranspiração acaba sendo reduzida mesmo que as condições climatológicas sejam favoráveis (BERRETA, POE e STOVIN, 2014). Ademais, outros fatores atrelados ao design dos telhados verdes, incluindo a espécie vegetal utilizada e as características da camada de substrato, exercem influência na perda de água das coberturas vegetadas (SIMS et al., 2016).

No Brasil, embora a obrigatoriedade de instalação de telhados verdes vem recebendo respaldo jurídico, tais como no estado de Santa Catarina (Lei nº 14.243/2007) e nas cidades de Recife (Lei nº 18.112/2015) e São Paulo (Lei nº 16.277/2015), os estudos em relação a eles são bastante incipientes e o foco, muitas vezes, acaba sendo a taxa de redução do escoamento, sem uma investigação pormenorizada dos processos físicos que podem contribuir para que tal redução

ocorra. Até o momento, não se tem conhecimento de nenhuma pesquisa, em âmbito nacional, que trate do comportamento da evapotranspiração em telhados verdes.

Por outro lado, em nível internacional, importantes estudos já foram realizados (REZAEI, 2005; BERGHAGE et al., 2007; VOYDE, 2011; BERRETTA, POE e STOVIN, 2014 e POE, STOVIN e BERRETTA, 2015). Estas pesquisas determinaram a evapotranspiração por meio de microlisímetros de pesagem ou empregando sensores de umidade na camada de substrato, sob condições climáticas controladas ou reais.

Dentre outras observações interessantes, as pesquisas conduzidas pelos autores supracitados identificaram que as taxas de evapotranspiração diferem entre as estações do ano, com verões apresentando valores mais altos de evapotranspiração, enquanto em condições frias de inverno, as taxas são substancialmente reduzidas (BERRETTA, POE e STOVIN, 2014; POE, STOVIN e BERRETTA, 2015). Isso sugere que o melhor desempenho dos telhados verdes no controle do escoamento pluvial possa ser alcançado em períodos quentes.

A vegetação é uma etapa chave no projeto de telhados verdes, pois ela é responsável pela extração de água da camada de substrato, por meio da demanda transpirativa. Um número considerável de pesquisadores defende o gênero *Sedum* como a vegetação ideal para telhados verdes extensivos (BERGHAGE et al., 2007; GETTER e ROWE, 2008). A indicação de espécies deste gênero deve-se ao fato de apresentarem Mecanismo Ácido Crassuláceo de fixação de Carbono (MAC). O MAC permite uma maior adaptabilidade das plantas diante das situações de estresse ambiental verificadas em coberturas vegetadas, com redução das taxas de evapotranspiração em períodos de baixa disponibilidade hídrica e aumento da perda de água quando da abundância desta (BERGHAGE et al., 2007; VOYDE, 2011). Essa característica é bastante importante em telhados verdes, já que a irrigação é uma prática indesejável sob o ponto de vista da sustentabilidade. Assim, o ideal é que as plantas reduzam a demanda de água em situações de restrição hídrica para garantir sua sobrevivência, mas que sejam eficientes na retirada de umidade após eventos chuvosos para que o substrato recupere sua capacidade de armazenamento (VOYDE, 2011).

De um modo geral, as pesquisas reconhecem a aplicabilidade dos telhados verdes como uma ferramenta inovadora na gestão das águas pluviais urbanas, porém apenas quando as taxas de evapotranspiração tiverem sido mensuradas e modeladas

é que o impacto dos mesmos poderá ser avaliado e previsto (REZAEI, 2005). Ademais, a partir de um esclarecimento mais minucioso dos processos hidrológicos que ocorrem em telhados verdes é que a técnica poderá ser aperfeiçoada e adaptada para diferentes condições climatológicas (FELLER, TRAVER e WADZUK, 2010; MARASCO et al., 2014).

A falta de dados disponíveis sobre evapotranspiração limita uma análise mais detalhada quanto ao funcionamento desses sistemas para as condições climáticas do Brasil. Muito embora existam informações disponíveis na literatura internacional, a utilização de valores oriundos desses estudos pode gerar grandes incertezas, pois além das condições climatológicas, a configuração (vegetação, tipo e profundidade do substrato) dos telhados verdes pode ser diferente.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo quantificar as taxas de evapotranspiração sob condições não padrão ou reais de cultivo e de disponibilidade hídrica em módulos experimentais de telhados verdes extensivos, em região de clima subtropical brasileiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MÓDULOS EXPERIMENTAIS

Dez módulos experimentais de telhados verdes extensivos foram construídos e monitorados na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rio Grande do Sul, Brasil. O sistema experimental foi instalado nas dependências do Centro de Tecnologia da UFSM em uma área externa destinada às pesquisas com telhados verdes desde o ano de 2010. Na área do experimento e em suas imediações ocorre a presença de vegetação de baixo porte, como gramíneas, e de alguns exemplares de *Eucalyptus sp.* No entanto, as condições do entorno não foram capazes de causar o sombreamento do conjunto experimental em estudo.

Os módulos foram compostos por bandejas de polipropileno, com dimensões externas de 0,590 m x 0,375 m x 0,145 m e internas de 0,560 m x 0,360 m x 0,135 m (C x L x H), resultando em uma área interna de 0,202 m².

Cada bandeja foi preenchida com uma geomembrana drenante de 10 mm de espessura, comercialmente conhecida como MacDrain[®] 2L, a qual foi obtida por meio de doação junto à empresa Maccaferri[®], e que serviu como camada de drenagem.

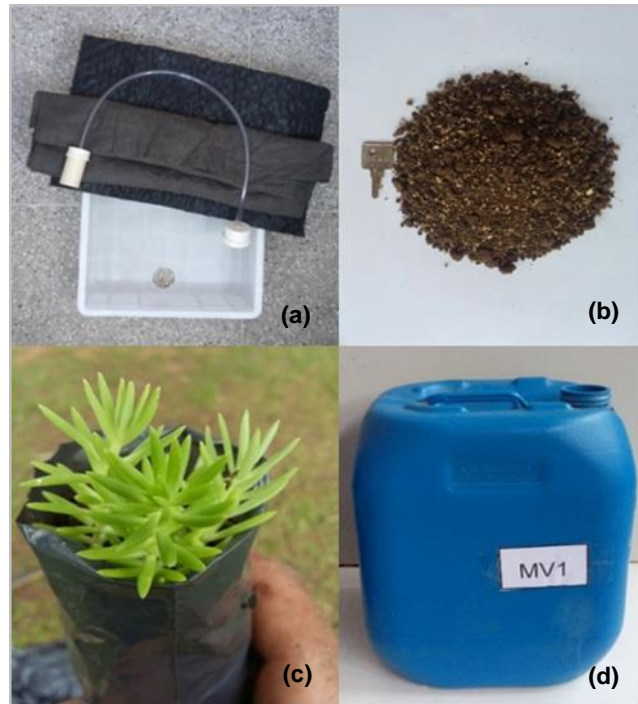
Sobre esta colocou-se uma manta geotêxtil como material filtrante que também envolveu as laterais das bandejas e por fim, o substrato num volume de 16 litros, resultando em uma camada de 80 mm de espessura. O substrato foi composto de solo (horizonte A de Argissolo Vermelho-Amarelo) coletado próximo à área experimental, vermiculita e condicionador de solo (MecPlant) nas proporções 3:1:1, respectivamente.

Para proporcionar a saída do excesso de água dos módulos, foram instalados drenos de fundo. Estes foram confeccionados utilizando dois CAP de 50 mm e 40 mm de diâmetro e uma mangueira transparente de 3/8". Uma das extremidades do dreno foi conectada na parte inferior das bandejas e a outra em recipientes de armazenamento (bombonas) com capacidade de 20 litros.

A última camada que compôs os módulos foi de vegetação, sendo que seis módulos receberam a cobertura da espécie *Sedum rupestre* e os quatro módulos restantes não foram plantados, servindo como controle. A escolha dessa espécie foi em função da adaptabilidade que a mesma tem demonstrado às condições climáticas locais. Entre as espécies utilizadas em estudos anteriores realizados com os telhados verdes da área experimental (PERSCH, 2012; TASSI et al., 2014; LORENZINI NETO, 2014), a *Sedum rupestre* foi a que melhor se desenvolveu. Além disso, o gênero *Sedum* é o mais utilizado em telhados verdes em escala real e em pesquisas científicas em todo o mundo, sobretudo na Europa. As mudas foram previamente condicionadas no viveiro do setor de paisagismo da UFSM e o transplântio para os módulos se deu no final do mês de Maio de 2016. Foram plantadas 50 mudas por módulo, obedecendo um espaçamento de 5 cm entre as mesmas, a fim de promover uma cobertura mais rápida das plantas sobre a superfície do substrato. A Figura 5 mostra os materiais utilizados na construção do conjunto experimental.

Após o transplântio, os módulos foram identificados e alocados a 1,24 m de altura em relação ao nível do solo sobre duas estruturas metálicas niveladas e instaladas no local de estudo. Uma inclinação de 1% em direção aos drenos garantiu o escoamento dos volumes de chuva excedentes dos módulos para as bombonas.

Figura 5 - Materiais utilizados na construção do conjunto experimental. (a) bandeja de polipropileno, dreno, manta geotêxtil e geomembrana drenante. (b) substrato. (c) espécie vegetal *Sedum rupestre*. (d) bombona para coleta da água escoada dos módulos.



Fonte: A autora.

2.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

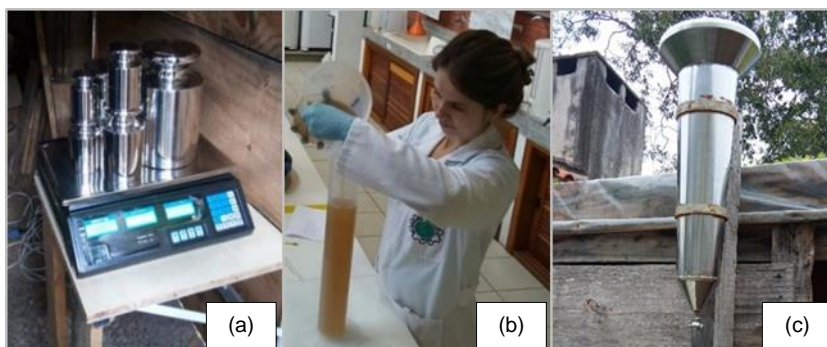
Os módulos foram tratados como microlísímetros e a quantificação da evapotranspiração e evaporação se deu por diferença de peso, considerando um intervalo de 24 horas. Para pesagem dos módulos foi utilizada uma balança eletrônica da marca *Vision*, com capacidade de 40 Kg e precisão de 2 g. A balança foi alocada sobre uma bancada nivelada e instalada dentro de uma casa em madeira existente na área do experimento.

A quantificação dos volumes diários precipitados se deu *in loco* a partir de um pluviômetro. Como este não dispunha de um medidor interno, as leituras eram realizadas utilizando-se uma proveta graduada de 0,1 mm com capacidade de 10 mm.

Os volumes de água provenientes da drenagem dos módulos e armazenados nas bombonas foram quantificados com o uso de provetas graduadas com capacidade de até 1000 mL.

A Figura 6 mostra a balança utilizada nas pesagens, o material empregado na quantificação dos volumes de água escoados dos módulos e o pluviômetro instalado no local.

Figura 6 - (a) balança eletrônica para pesagem dos módulos. (b) material utilizado na quantificação da água escoada dos módulos. (c) pluviômetro instalado no local para registro das precipitações.



Fonte: A autora.

Os dados coletados diariamente eram anotados em caderno de campo, e posteriormente, tabulados no Microsoft Excel[®]. Além deste programa, outros softwares como o Minitab 17.0[®], Statistica 7.0 da Statsoft[®] e o Action[®] 2.7 foram utilizados para o processamento dos dados.

2.3 MONITORAMENTO EXPERIMENTAL

A construção dos módulos deu origem ao conjunto experimental apresentado na Figura 7-a. A sigla MV corresponde aos Módulos Vegetados (MV1, MV2, MV3, MV4, MV5 e MV6), já MNV se refere aos Módulos Não Vegetados (MNV1, MNV2, MNV3, MNV4). A perda de água dos módulos vegetados correspondeu à evapotranspiração, enquanto a ocorrida nos módulos não vegetados, à evaporação do substrato. Por meio da diferença entre esses dois componentes se obteve a parcela de transpiração vegetal.

Figura 7 - (a) conjunto experimental instalado com a identificação dos módulos. (b) sistema de polias para a suspensão dos módulos.



Fonte: A autora.

A partir do momento em que os módulos foram levados a campo (01/06/2016), esperou-se um mês para dar início ao monitoramento com a finalidade de proporcionar uma melhor cobertura das plantas sobre o substrato. Durante esse período de adaptação vegetal, uma lona plástica transparente precisou ser fixada na parte superior da torre metálica como forma de proteger a vegetação das adversidades do tempo, especialmente, da geada. Além disso, nesse período, um sistema de polias foi construído para facilitar a suspensão dos módulos (Figura 7-b). Assim, foi necessário fixar correntes nos vértices dos mesmos as quais eram presas às polias.

O início do monitoramento (01/07/2016) se deu com todos os módulos na capacidade de vaso (conforme procedimento de determinação descrito mais adiante) como forma de proporcionar as mesmas condições iniciais de umidade.

2.3.1 Calibração da balança

Previamente às pesagens dos módulos, a balança eletrônica foi calibrada pelo Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos (LADIPP) da UFSM e seguiu as normativas do United Kingdom Accreditation Service (UKAS, 2015), da European Association of National Metrology Institutes (EURAMET, 2011) e da Portaria nº 236/1994 do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO, 1994). Como o local onde a balança estava instalada era sujeito às condições de umidade, vento, variações de temperatura e ruídos, o procedimento de calibração foi realizado por mais duas vezes (26/08/2016 e 15/12/2016) a fim de verificar possíveis alterações na precisão do equipamento. As cópias dos certificados de calibração encontram-se no Apêndice A.

2.3.2 Rotina de monitoramento

A partir do início do monitoramento (01/07/16), a rotina de pesagem foi diária, com exceção de alguns finais de semana e feriados em que não houve a possibilidade de medição. Conforme mostrado na Figura 8, antes da pesagem, os drenos eram desconectados das bombonas e vedados com uma tampa de silicone para evitar possíveis perdas de água. Cada um dos módulos era suspenso pelo sistema de polias e, posteriormente, transportado por duas pessoas até a balança. Após a pesagem, cada módulo era recolocado na posição de origem.

Durante o período de 01 de Julho de 2016 até 15 de Outubro do mesmo ano, as pesagens foram realizadas às 16 horas. A partir do início do horário de verão, em 16 de Outubro de 2016, o horário de pesagem foi alterado para às 17 horas.

Como comentado na subseção 2.2, a quantificação dos volumes precipitados foi realizada por meio do pluviômetro instalado no local. Todavia, quando da impossibilidade de medições *in loco* ou em caso de falhas de medição, recorreu-se aos registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação climatológica

automática do INMET-A803 localiza-se, a aproximadamente, 1,5 km da área experimental e nela a precipitação é registrada por um pluviômetro de balsa.

Figura 8 - Rotina de pesagem dos módulos. (a) retirada dos drenos das bombonas e vedação do orifício de saída da mangueira. (b) transporte dos módulos até a balança. (c) pesagem dos módulos.



Fonte: A autora.

A quantificação da precipitação, bem como da água escoada dos módulos e armazenada nas bombonas foi realizada, diariamente, nos mesmos horários de pesagem dos módulos.

Nos dias em que não houve monitoramento, como por exemplo, finais de semana (Sábado e Domingo), a quantificação da precipitação, escoamento e pesagem dos módulos se deu na Segunda-feira. Assim, os volumes correspondiam aos acumulados de três dias. Esses valores acumulados também eram resultantes de feriados ou demais dias em que o monitoramento foi impossibilitado devido à ausência de pessoal que auxiliasse nas medições.

Os módulos MV1, MV3, MV5 e MNV1 e MNV3 foram irrigados durante todo o período de monitoramento. Esse procedimento era realizado sempre que constatado que o peso de cada módulo estava abaixo do valor de capacidade de vaso (CV). A irrigação se dava sobre a própria balança (Figura 9) e era interrompida quando o módulo atingisse valor próximo da CV. O objetivo da irrigação era manter umidade suficiente para as plantas, a fim de que a evapotranspiração em condições padrão (com suprimento de água) pudesse ser quantificada. Neste trabalho, a capacidade de vaso, que tem o mesmo sentido conceitual de capacidade de campo, correspondeu ao peso dos módulos após a sua saturação e posterior drenagem por 24 horas

(ZONTA et al., 2016). O Apêndice B apresenta o peso de cada módulo na capacidade de vaso, sendo que o valor médio foi de, aproximadamente, 22 Kg.

Figura 9 - Irrigação dos módulos experimentais (MV1, MV3, MV5, MNV1, MNV3) sobre a balança de pesagem.



Fonte: A autora.

A rotina de monitoramento possibilitou resolver a equação 6 de balanço hídrico em telhados verdes. Salienta-se que o termo referente à irrigação só foi computado na equação de balanço para o caso dos módulos MV1, MV3, MV5, MNV1 e MNV3.

$$ET = \frac{W_{i-1} + (P \times A) + I - D_r - W_i}{A} \quad (6)$$

Sendo:

ET: a evapotranspiração (mm dia⁻¹);

W_{i-1}: o peso inicial dos módulos (Kg);

P: a precipitação pluviométrica (L m⁻²);

A: a área dos módulos (0,202 m²);

I: a irrigação (L);

D_r: a drenagem (L);

W_i: o peso final dos módulos (Kg).

Para conversão da precipitação pluviométrica, irrigação e drenagem em quilograma, considerou-se a densidade da água igual a 1.

2.3.3. Obtenção das variáveis climatológicas

Os dados das variáveis climatológicas (descritas no Quadro 2 juntamente com os instrumentos de medição) de influência nas taxas de evapotranspiração foram obtidos a partir da estação climatológica automática do INMET. Na estação os registros eram feitos em altura padrão, a qual era um pouco superior à altura utilizada na instalação experimental, com exceção da medição de velocidade do vento, a qual era feita a 10 metros de altura.

Quadro 2 - Variáveis climatológicas utilizadas e características dos instrumentos de medição.

Variáveis climatológicas	Instrumentos de medição	Modelo/Marca	Intervalo de medição (s)	Altura acima do solo (m)
Temperatura do ar (máxima e mínima)	Termômetro	QMT102/Vaisala	5	1,80
Umidade relativa do ar (máxima e mínima)	Higrômetro	QMH101/Vaisala	5	1,80
Radiação solar global	Piranômetro	CM6B/Kipp & Zonen	5	1,50
Velocidade do vento	Sônico	1405-PK-021/Gill Instruments	-	10,00
Precipitação	Pluviômetro	QMR102/Vaisala	10	1,50

Fonte: Organizado pela autora com base nas informações fornecidas pelo INMET via correspondência eletrônica.

As informações eram disponibilizadas no site do INMET de hora em hora e em Tempo Universal Coordenado (UTC). Deste modo, primeiramente, os registros foram compatibilizados com o horário de Brasília e depois os valores foram transformados para a base diária por meio da média horária, com exceção da radiação solar global, a qual teve os valores horários somados, resultando na radiação solar total incidente. Esse tratamento levou à obtenção das seguintes variáveis em um intervalo de tempo diário: Temperatura máxima média ($T_{\text{máx méd}}$); Temperatura mínima média ($T_{\text{mín méd}}$); Temperatura média ($T_{\text{méd}}$); Umidade relativa do ar máxima média ($UR_{\text{máx méd}}$);

Umidade relativa do ar mínima média ($UR_{\text{mín méd}}$); Umidade relativa do ar média ($UR_{\text{méd}}$); Velocidade do vento média ($V_{\text{vméd}}$); Radiação solar global (Rad).

2.3.4 Tratamento e análise dos dados

As perdas de água por evapotranspiração e evaporação foram quantificadas, experimentalmente, em base diária, o que permitiu análises posteriores considerando a escala de tempo mensal e sazonal.

Dias com dados duvidosos, tais como aqueles em que houve uma grande variabilidade na perda de água entre os módulos (verificados comumente no dia posterior a um evento chuvoso) ou com falhas de medição foram descartados. Além disso, para que fosse possível analisar os dados de evapotranspiração na base diária foram desconsiderados os valores acumulados decorrentes de dias não monitorados, tais como finais de semana e feriados. No entanto, esses valores foram mantidos para a análise no intervalo de tempo mensal e sazonal.

Os valores de evapotranspiração e evaporação observados, bem como os das variáveis climatológicas e de chuva foram organizados em planilha eletrônica e a partir disso, tratados estatisticamente. Foi utilizada a estatística descritiva para expressar os dados em termos de média, mediana, soma, desvio padrão, mínimos, máximos e percentuais na escala mensal e sazonal. Os dados de evapotranspiração e evaporação diários foram testados quanto à normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk a um nível de significância de 5%. Para verificar possíveis diferenças significativas entre as taxas de evapotranspiração e evaporação o teste não-paramétrico de Wilcoxon pareado, com nível de significância de 5%, foi aplicado. Além disso, para uma melhor informação visual e entendimento das variações, fez-se o uso de métodos gráficos, como de séries temporais e box plot.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir são referentes aos módulos não irrigados (MV2, MV4, MV6, MNV2 e MNV4). Optou-se pela apresentação dos resultados para estes módulos, tendo em vista que os telhados verdes em escala real, normalmente, não recebem irrigação e assim, os módulos mencionados podem retratar de maneira mais fidedigna o comportamento da evapotranspiração.

3.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DO PERÍODO DE MONITORAMENTO

O período de monitoramento foi de oito meses, iniciado em 01 de Julho de 2016 e concluído em 28 de Fevereiro de 2017. Assim, dias representativos de inverno, primavera e verão puderam ser avaliados.

A Tabela 1 apresenta, juntamente com as normais climatológicas, as médias mensais das variáveis climáticas monitoradas durante o estudo, bem como os acumulados de chuva para cada mês. Os meses de Dezembro de 2016 e Janeiro de 2017 restringiram-se a 22 e 25 dias de observações, respectivamente e, portanto, os valores apresentados referem-se a esse período.

Tabela 1 - Caracterização climática para os meses de Julho a Dezembro de 2016 e Janeiro e Fevereiro de 2017.

Variáveis		Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.
Temperatura (°C)	Norm.	14,1	14,2	16,5	18,6	21,0	23,3	24,2	23,9
	T _{méd}	13,3	15,4	14,9	18,4	20,2	23,3	24,0	24,0
	T _{máx méd}	14,0	16,0	15,5	18,9	20,8	23,9	24,5	24,6
	T _{mín méd}	13,0	14,8	14,3	17,8	19,6	22,6	23,4	23,5
Umidade relativa (%)	Norm.	80,0	78,0	78,0	73,0	71,0	69,0	71,0	76,0
	UR _{méd}	85,1	81,9	80,2	81,4	74,4	74,5	84,3	86,0
	UR _{máx méd}	87,2	84,7	83,0	84,0	77,9	77,6	87,3	88,9
	UR _{mín méd}	83,0	79,1	77,5	78,7	70,9	71,4	81,2	82,8
Radiação solar (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Norm.	9,8	11,7	14,5	19,0	21,9	23,0	21,7	20,6
	Rad _{méd}	9,8	11,8	16,8	17,2	23,1	22,5	21,4	19,1
Velocidade do vento (m s ⁻¹)	Norm.	2,9	2,9	3,1	3,3	3,2	3,1	2,9	2,9
	V _v _{méd}	2,0	1,8	2,0	2,3	2,0	2,1	2,0	1,7
Precipitação total (mm)	Norm.	144,9	142,1	124,3	128,2	120,5	142,2	163,0	127,2
	Obs.	91,4	122,7	54,6	400,0	165,6	34,4*	184,3*	226,5

Norm.: normais climatológicas do Brasil 1961 a 1990 (disponibilizadas pelo INMET). Normal climatológica de radiação solar do período de 1976-2005 (disponibilizada no Atlas Climático do RS). **Obs.:** precipitação observada nos meses de monitoramento a partir de dados registrados *in loco* e provenientes do INMET. *Total de chuva ocorrida em 22 dias monitorados em Dezembro e em 25 dias em Janeiro. **T:** temperatura; **UR:** umidade relativa; **Rad.:** radiação solar; **V_v:** velocidade do vento.

Fonte: A autora.

Os meses de Outubro e Novembro de 2016 se caracterizaram por uma grande pluviosidade, enquanto que em Julho, Agosto, Setembro e Dezembro do mesmo ano o volume de chuva ficou abaixo da normal climatológica. Para os meses de Janeiro e Fevereiro de 2017 também foram registradas chuvas acima da média histórica.

Quanto às demais variáveis climatológicas, se observa que Novembro e Dezembro de 2016 apresentaram condições bastante favoráveis às perdas de água por evapotranspiração. Em ambos os meses foram registradas altas temperaturas e radiação solar e baixa umidade relativa do ar. Os meses de Janeiro e Fevereiro de 2017 também tiveram temperaturas elevadas, no entanto como a umidade relativa do ar foi alta é provável que tenha ocorrido uma interferência no sentido de reduzir as taxas de evapotranspiração.

Na Tabela 2 são apresentadas as características climáticas sazonais observadas no período de estudo, bem como os volumes de chuva acumulados, os quais foram muito expressivos no período primaveril.

Como era de se esperar, a primavera e o verão foram as estações do ano com condições mais favoráveis às perdas de água por evapotranspiração. Em ambos os períodos, as temperaturas e a radiação solar foram elevadas, porém, no verão a umidade relativa do ar foi expressiva, superando, inclusive, a média registrada no inverno.

Tabela 2 - Caracterização climática para as estações do ano monitoradas.

Variáveis		Inverno (01/07 a 21/09/2016)	Primavera (22/09 a 21/12/2016)	Verão (22/12 a 28/02/2017)
T (°C)	T _{med}	14,5	19,5	23,9
	T _{máx méd}	15,0	20,1	24,5
	T _{mín méd}	14,0	18,9	23,3
UR (%)	UR _{med}	83,3	76,1	85,1
	UR _{máx méd}	85,8	79,2	88,1
	UR _{mín méd}	80,9	72,9	82,1
Rad. (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Rad _{méd}	11,9	21,1	20,1
Vento (m s ⁻¹)	V _{vméd}	1,9	2,1	1,8
Precipitação (mm)	-	268,7	592,9	417,8

Fonte: A autora.

3.2 COMPORTAMENTO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E EVAPORAÇÃO

Após a exclusão de valores incoerentes, chegou-se a um número de dados válidos de evapotranspiração e evaporação, sendo que os mesmos foram analisados na escala diária, mensal e sazonal. Na análise diária, para a determinação da média, mediana, desvio padrão, mínimos e máximos, não foram considerados os valores acumulados decorrentes de dias não monitorados. Já para a análise em um intervalo de tempo mensal e sazonal, os valores acumulados foram mantidos.

A Tabela 3 mostra o número de dias com dados aproveitáveis ou válidos, levando em consideração os critérios descritos.

Tabela 3 - Número de dias com dados válidos para os meses de Julho a Dezembro de 2016, Janeiro e Fevereiro de 2017 e para as estações de inverno, primavera e verão.

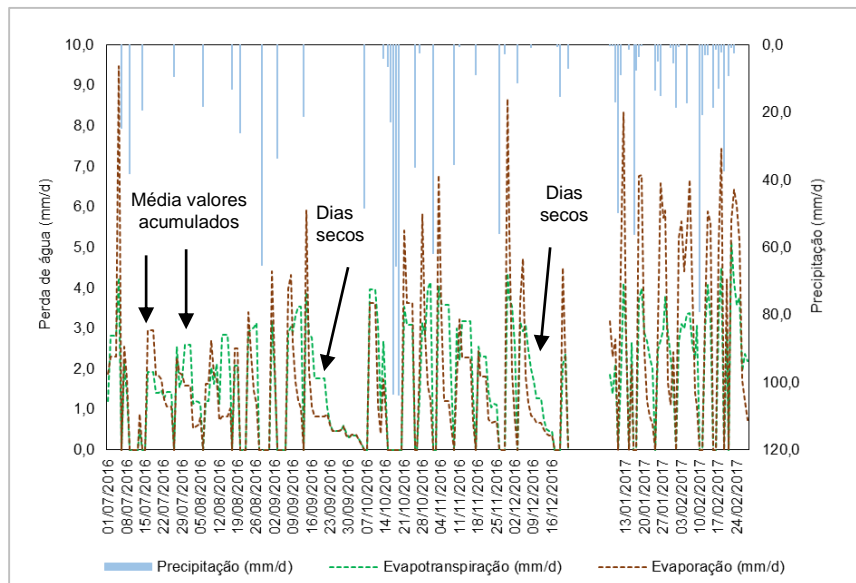
Período	Nº de dias com dados válidos*	Nº de dias com dados**
Julho	10	15
Agosto	16	18
Setembro	18	20
Outubro	12	15
Novembro	13	16
Dezembro	14	16
Janeiro	20	20
Fevereiro	21	21
Inverno	38	45
Primavera	44	53
Verão	41	41

Fonte: A autora.

3.2.1 Taxas de evapotranspiração e evaporação diárias

A Figura 10 mostra o comportamento das taxas diárias de evapotranspiração e evaporação, acompanhadas pela precipitação registrada ao longo dos meses de monitoramento.

Figura 10 - Comportamento das precipitações, das taxas de evapotranspiração e evaporação ao longo do período monitorado.



Fonte: A autora.

Conforme se observa, as perdas de água por evaporação do substrato (módulos não vegetados) foram maiores que as taxas de evapotranspiração (módulos vegetados) nos primeiros dias após a chuva (normalmente entre o primeiro e o terceiro dia seco). Em virtude da disponibilidade de água, ausência de sombreamento e do baixo albedo da superfície era de se esperar que os módulos não vegetados apresentassem esse comportamento, já que os mesmos estavam diretamente expostos à ação das variáveis climatológicas. Essa mesma constatação foi feita por Voyde (2011), Berretta, Poe e Stovin (2014) e Soulis et al. (2017), com experimento em campo e por Poe, Stovin e Berretta (2015) em ambiente de laboratório. No entanto, esses resultados foram divergentes dos encontrados por Rezaei (2005) e Berghage et al. (2007) em seus experimentos realizados em estufa. Nestes estudos, os autores verificaram uma maior perda de água nos módulos vegetados em relação aos módulos sem vegetação após a irrigação.

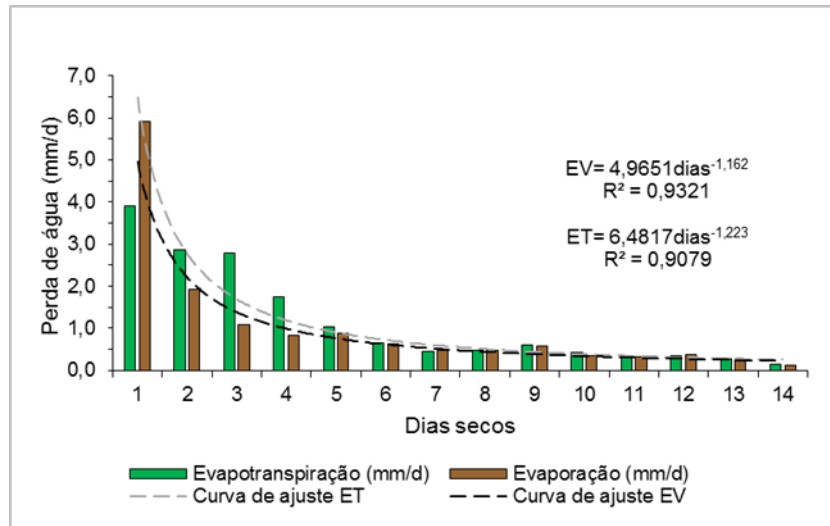
No decorrer dos dias secos, conforme a água na camada de substrato se tornou limitante, as taxas de evaporação foram reduzidas e a evapotranspiração, por sua vez, passou a ser predominante, conforme indicado pelas setas “dias secos” na Figura 10. Esse comportamento mostra que as plantas são capazes de promover uma gradual perda de água do substrato, o que é essencial para a sobrevivência das mesmas, mas

também indica que elas podem extrair umidade adicional da camada de substrato, auxiliando na recuperação da sua capacidade de armazenamento. A parcela de transpiração vegetal, determinada pela diferença entre a evapotranspiração e evaporação, correspondeu, em média, a 45,0% da evapotranspiração, com variabilidade entre 10,0% e 75,0%. Berghage et al. (2007) e Voyde (2011) verificaram percentuais de 15,0-45,0% e 20,0-48,0%, respectivamente. Esses valores demonstram que a transpiração vegetal é um importante componente do balanço hídrico de telhados verdes e pode contribuir na recuperação do armazenamento de água na camada de substrato. Na Figura 10 também é indicado, por meio de seta, a média dos valores acumulados de evapotranspiração e evaporação decorrente de dias não monitorados, tais como finais de semana e feriados.

A Figura 11 ilustra o comportamento exponencial decrescente da perda de água tanto dos módulos vegetados como não vegetados, para o período mais longo com dias consecutivos sem chuva registrado no período de monitoramento (entre final de Setembro e início de Outubro de 2016). Observa-se que a evaporação foi maior no primeiro dia após o evento chuvoso e, a partir de então, a evapotranspiração predominou por cerca de 3 dias, quando tanto evapotranspiração como evaporação passaram a apresentar um comportamento semelhante com taxas muito baixas, próximas de zero. Isso comprova que a evapotranspiração é dependente do conteúdo de umidade no substrato.

O decaimento das taxas de evapotranspiração e evaporação ao longo dos dias pode ser explicado pelas curvas de ajuste mostradas na Figura 11, as quais apresentaram um alto coeficiente de determinação (R^2). Deve-se levar em consideração que essas curvas, embora permitam um melhor entendimento do comportamento da evapotranspiração em telhados verdes após a chuva, são representativas apenas do período em que os valores foram observados, já que esse decaimento pode ser mais ou menos acentuado conforme as condições climatológicas e os teores de água no substrato. Um período de monitoramento mais longo permitiria gerar curvas de decaimento para diferentes estações do ano, o que auxiliaria na compreensão de uma abordagem para modelar a evapotranspiração em telhados verdes, considerando o conteúdo de água na camada de substrato.

Figura 11 - Decaimento da evapotranspiração e evaporação ao longo de 14 dias secos consecutivos, observados entre o final de Setembro e início de Outubro de 2016.



Fonte: A autora.

A partir da determinação dos volumes escoados durante todo o período de monitoramento, verificou-se que os módulos não vegetados geraram um volume de escoamento superficial ligeiramente menor (555,4 mm) que os módulos vegetados (605,3 mm). Possivelmente esse comportamento tenha ocorrido em função dos módulos não vegetados perderem mais água do substrato por evaporação, proporcionando recuperação da capacidade de armazenamento deste para eventos chuvosos subsequentes.

Neste sentido, Berretta, Poe e Stovin (2014) comentam que, enquanto os módulos vegetados podem ser melhores para conservar a água e proporcionar a sobrevivência das plantas, eles são menos eficientes na retenção das precipitações frequentes em comparação aos módulos não vegetados, corroborando com os resultados obtidos neste estudo. Os autores ainda afirmam que o efeito da vegetação é mais evidente depois de transcorridos alguns dias secos. Além disso, no caso deste estudo, acredita-se que em função da *Sedum rupestre* apresentar um sistema radicular raso, a extração de umidade em profundidades maiores possa ter sido comprometida o que, conseqüentemente, resultou em menor capacidade de armazenamento de água na camada de substrato. A frequência com qual as precipitações ocorreram também, possivelmente, não proporcionou tempo suficiente para que as plantas pudessem extrair maior umidade do sistema.

Embora essa constatação indique que o desempenho dos módulos vegetados é inferior ao dos módulos não vegetados no controle do escoamento e suscite dúvidas quanto a real necessidade de se utilizar vegetação em telhados concebidos para serem verdes, deve-se pesar o fato de que estes sistemas podem oferecer benefícios térmicos, estéticos e de biodiversidade no meio urbano, os quais são alcançados com a presença das plantas. Além disso, a vegetação tem o importante papel de amortecer o impacto mecânico da chuva no substrato, impedindo que as partículas sólidas sejam carregadas para a rede de drenagem.

A Tabela 4 apresenta a estatística descritiva das taxas de evapotranspiração e evaporação observadas para cada um dos meses monitorados, bem como para as estações e para todo o período de estudo. Os resultados são discutidos com base na mediana, tendo em vista que os dados não atenderam aos pressupostos de normalidade, ou seja, p-valor $\leq 0,05$ pelo teste de Shapiro-Wilk.

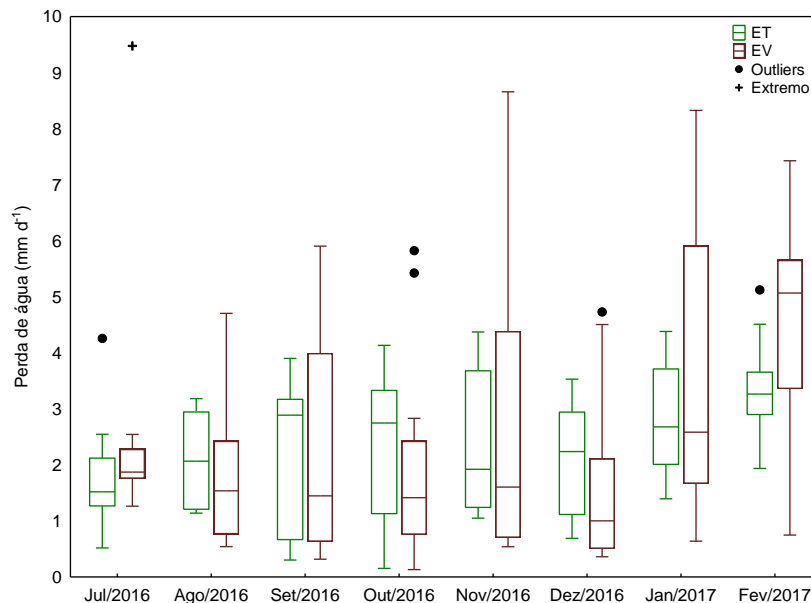
Tabela 4 - Estatística descritiva dos dados de evapotranspiração e evaporação observados.

Período	Média (mm d ⁻¹)		Mediana (mm d ⁻¹)		Desvio-padrão (mm d ⁻¹)		Máximo (mm d ⁻¹)		Mínimo (mm d ⁻¹)	
	ET	EV	ET	EV	ET	EV	ET	EV	ET	EV
Julho	1,8	2,6	1,5	1,9	1,0	2,5	4,3	9,5	0,5	0,9
Agosto	2,1	1,7	2,1	1,5	0,8	1,2	3,2	4,7	1,1	0,5
Setembro	2,2	2,1	2,9	1,4	1,3	1,8	3,9	5,9	0,3	0,3
Outubro	2,3	2,0	2,7	1,4	1,4	1,9	4,1	5,8	0,2	0,1
Novembro	2,4	2,8	1,9	1,6	1,3	2,8	4,4	8,7	1,0	0,5
Dezembro	2,1	1,7	2,2	1,0	1,0	1,5	3,5	4,7	0,7	0,4
Janeiro	2,7	3,7	2,7	2,6	0,9	2,5	4,4	8,3	1,4	0,6
Fevereiro	3,3	4,4	3,3	5,1	0,8	2,0	5,1	7,4	1,9	0,7
Inverno	2,3	2,3	2,3	1,9	0,9	1,8	4,3	9,5	0,5	0,5
Primavera	2,0	1,9	1,8	1,0	1,2	2,0	4,4	8,7	0,2	0,1
Verão	3,0	4,0	3,0	4,3	0,9	2,3	5,1	8,3	1,4	0,6
Todo período	2,4	2,7	2,6	1,9	1,1	2,2	5,1	9,5	0,2	0,1

Fonte: A autora.

O diagrama de caixas (Figura 12) mostra a variabilidade das taxas de evapotranspiração e evaporação diárias, a qual é reflexo da variabilidade climatológica e do conteúdo de umidade disponível nos módulos. Os outliers correspondem aos dias em que os módulos apresentavam disponibilidade de água (normalmente no dia posterior ao evento de chuva) e as condições climatológicas favoreciam o processo de perda de água para a atmosfera.

Figura 12 - Variabilidade dos valores de evapotranspiração e evaporação para cada mês monitorado.



Fonte: A autora.

Julho de 2016 se caracterizou por ser um mês com baixas temperaturas e radiação solar, o que justifica as menores taxas de evapotranspiração observadas. Como nesse período a cobertura vegetal ainda não estava totalmente estabelecida havendo substrato exposto, as taxas de evaporação foram superiores. O valor extremo destacado corresponde ao dia 05/07/2016. Esse dia foi marcado pela grande disponibilidade de água, já que o monitoramento teve início no dia 01/07/2016 e todos os módulos haviam sido saturados, associado à temperatura média de 25 °C (a maior registrada no mês), UR média de 52% (a menor registrada no mês e em todo o período de monitoramento) e velocidade média do vento de 4,9 m s⁻¹ (a maior registrada no mês e em todo o período de monitoramento).

Agosto e Setembro de 2016 tiveram um comportamento climático bastante semelhante, sem grandes diferenças entre temperatura, umidade relativa e velocidade do vento. No entanto, Setembro registrou um volume de chuva menor (54,6 mm) e maior número de dias consecutivos sem chuva, além de maior radiação solar em relação ao mês anterior.

Outubro de 2016 foi marcado por eventos frequentes de chuva, a maioria deles de grandes volumes como os registrados no dia 17/10/2016 (103,6 mm) e no dia 19/10/2016 (103,8 mm). No entanto, os poucos dias secos registrados no mês

(máximo de 6 dias secos consecutivos) apresentaram alta radiação solar (média de 21,6 MJ m⁻² d⁻¹).

Os meses de Novembro e Dezembro de 2016 apresentaram uma ligeira redução da evapotranspiração, embora as condições climatológicas (sobretudo radiação solar, umidade relativa e temperatura) tenham sido favoráveis às perdas de água. Isso sugere que outros fatores, muito provavelmente inerentes à vegetação, possam ter influenciado nessa resposta. No entanto, os 22 dias observados em Dezembro se caracterizam por baixos volumes de chuva e isso também contribuiu para limitar a evapotranspiração.

Janeiro e Fevereiro de 2017 foram marcados por chuvas frequentes e, embora, a umidade relativa tenha sido elevada (média de 84,0% em Janeiro e de 86,0% em Fevereiro), acredita-se que o efeito da mesma tenha sido atenuado pela alta radiação (média de 21,4 MJ m⁻² d⁻¹ em Janeiro e de 19,1 MJ m⁻² d⁻¹ em Fevereiro) e temperatura (média de 24,0 °C em ambos os meses).

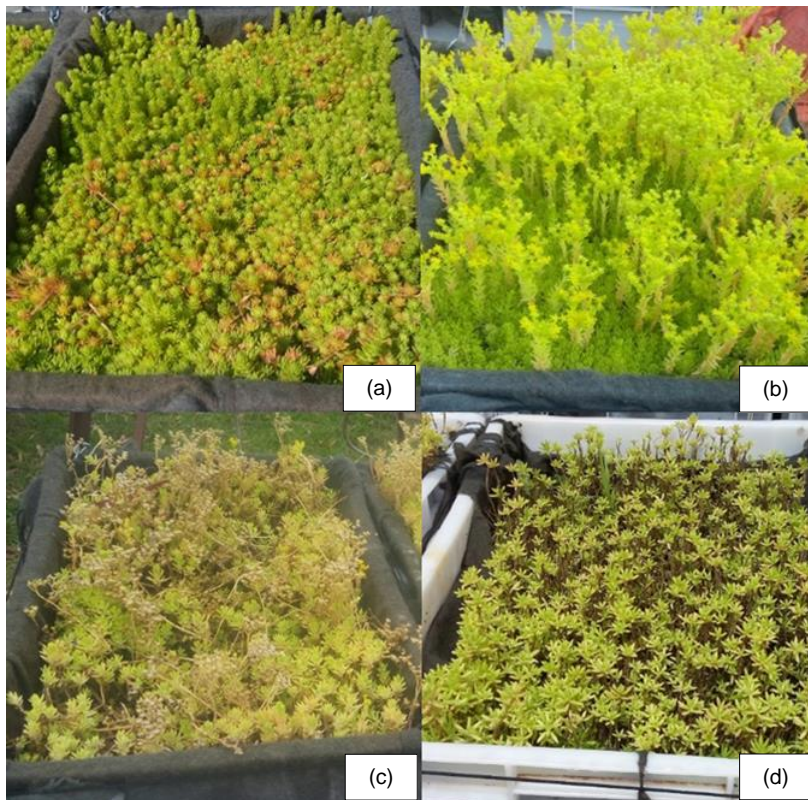
O estágio fenológico da vegetação também é um fator de influência nas taxas de evapotranspiração (ROZA, 2010). Neste estudo, foi observado que a evapotranspiração foi mais expressiva durante a fase vegetativa e reprodutiva das plantas, diminuindo no período da senescência.

Quando a vegetação se encontra na fase vegetativa, ocorre seu intenso desenvolvimento estrutural, notadamente do sistema radicular e das folhas (TAIZ e ZEIGER, 2006). As raízes são o veículo de absorção de água e nutrientes pelas plantas, enquanto que as folhas são o meio de trocas gasosas entre a planta e a atmosfera (KLAR, 1984; REICHARDT e TIMM, 2004). Os meses de Agosto e Setembro de 2016 foram períodos de pleno crescimento da vegetação com grande aumento da biomassa verde, o que justifica as maiores taxas de evapotranspiração observadas. Outubro de 2016 foi marcado pela fase reprodutiva das plantas, com o aparecimento de flores. Como estas também são dotadas de estômatos (APPEZZATO-DA-GLÓRIA, 2006), acredita-se que essa condição também possa ter contribuído para aumentar a perda de água pela vegetação. A senescência e a morte celular das plantas, observadas entre Novembro e Dezembro, ocorrem em função de alterações hormonais e por fatores ambientais (TAIZ e ZEIGER, 2006). Essa fase é marcada, muitas vezes, pela abscisão ou perda das folhas (TAIZ e ZEIGER, 2006), o que acaba por reduzir a área foliar e, conseqüentemente, a parcela de transpiração.

Após a senescência, a vegetação remanescente estagnou seu desenvolvimento, apresentando folhas concentradas apenas no ápice do caule, o que diminuiu a participação das plantas no processo de evapotranspiração. A exposição da camada de substrato provavelmente influenciou nos valores de evapotranspiração observados em Janeiro e Fevereiro de 2017. Embora em Fevereiro a evapotranspiração não tenha apresentado grandes discrepâncias em relação aos meses anteriores, é possível observar (Figura 12) que, comparativamente à evaporação, as taxas de evapotranspiração foram menores, o que pode ser reflexo da condição vegetativa da planta.

A Figura 13 mostra o aspecto da vegetação, onde é possível verificar uma redução da biomassa vegetal no final do experimento em relação ao seu início, bem como a alteração da coloração das plantas.

Figura 13 - Aspecto da vegetação ao longo do período de estudo. (a) fase inicial (Agosto). (b) fase de floração (Setembro-Outubro). (c) fase de senescência (Novembro). (d) fase final (Janeiro-Fevereiro).



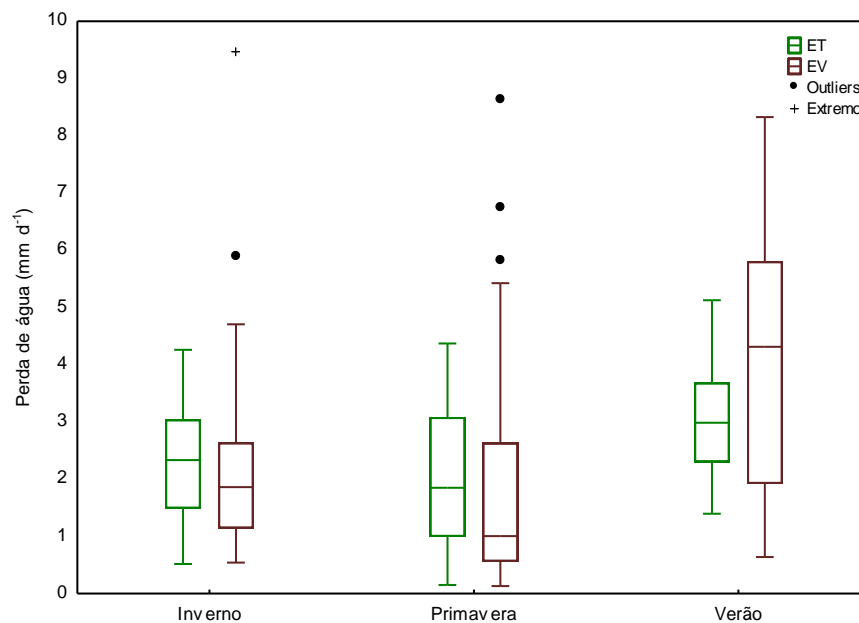
Fonte: A autora.

Concomitantemente à presente pesquisa, outro estudo com telhado verde foi conduzido por outro pesquisador na área do experimento e o mesmo comportamento para a *Sedum rupestre* foi observado. Além disso, em 2016, Palmeira (2016) também constatou uma mudança no aspecto desta espécie, em estudo com telhado verde instalado no local. A autora verificou um aumento da biomassa vegetal e a floração entre os meses de Setembro e Novembro (2015) e a senescência das plantas entre Dezembro (2015) e Maio (2016).

É válido comentar aqui que, mesmo com o término do monitoramento quantitativo, o acompanhando visual da vegetação continuou a ser realizado. Em Maio de 2017 foi constatado o brotamento de novas folhas. Assim, em função do ciclo vegetativo inerente à planta, é de se esperar que os telhados verdes apresentem um decréscimo nas taxas de evapotranspiração e porventura um comprometimento no desempenho de suas funções em determinadas épocas do ano.

Com relação à evapotranspiração diária na escala sazonal (Figura 14) é possível verificar que as taxas foram maiores no verão em relação às estações de inverno e primavera, o que se justifica pelas condições mais quentes observadas (conforme mostrado na Tabela 2) e, possivelmente, pela maior exposição do substrato nesse período. Na primavera, embora as condições climatológicas tenham sido mais favoráveis em relação ao inverno, a evapotranspiração foi ligeiramente inferior. Acredita-se que esse resultado tenha sido influenciado pelas baixas taxas de evapotranspiração (próximas de zero) verificadas entre os dias 22/09/2016 a 05/10/2016, já que não houve precipitações nesse período, bem como por situação semelhante observada entre os dias 13/12/2016 a 16/12/2016. Os eventos de chuva frequentes, e muitas vezes de grandes volumes, também podem ter inviabilizado o processo de evapotranspiração.

Figura 14 - Distribuição dos valores de evapotranspiração e evaporação diários para cada estação do ano monitorada.



Fonte: A autora.

Neste estudo, as taxas de evapotranspiração medianas foram de 2,6 mm dia⁻¹ para todo o período de monitoramento e de 3,0 mm dia⁻¹, 2,3 mm dia⁻¹ e 1,8 mm dia⁻¹ para o verão, inverno e primavera, respectivamente. As variações dos valores de evapotranspiração observados estão dentro da faixa encontrada por outros autores, tais como Rezaei et al. (2005) que, com experimento em estufa, observaram taxas de evapotranspiração de 0,61 mm dia⁻¹ ao simular condições climáticas de inverno e de 1,12 mm dia⁻¹ para condições ajustadas de primavera/outono. Os módulos vegetados avaliados pelos autores foram constituídos por uma mistura das espécies *Sedum album* e *Delosperma nubigenum*. Poe, Stovin e Berretta (2015) também em ambiente com condições climáticas controladas, encontraram taxas médias de evapotranspiração de 2,0 mm dia⁻¹ para a primavera e de 3,4 mm dia⁻¹ para o verão. Voyde (2011), em condições reais, observou taxas máximas de evapotranspiração de, aproximadamente, 4 mm dia⁻¹ para as espécies *Sedum mexicanum* e *Disphyma australe*. Berretta, Poe e Stovin (2014) também observaram, sob condições climáticas reais, taxas máximas de evapotranspiração de 4 mm dia⁻¹ e de 1 mm dia⁻¹ para as estações de verão e inverno, respectivamente.

Em razão dessas pesquisas terem sido realizadas em escala de campo ou em ambiente controlado, sob diferentes condições climatológicas e distintas

configurações de telhados verdes, torna-se difícil a comparação entre os estudos (BERNDTSSON, 2010). Para superar este problema, Sia (2016) sugere avaliar o impacto das condições climatológicas nas taxas de evapotranspiração usando configurações de telhados verdes iguais e, preferencialmente, em condições de campo. Além disso, entende-se ser de suma importância que pesquisas nesta área sejam realizadas em diferentes regiões climáticas do Brasil, como forma de confrontar os resultados e assim compreender melhor o comportamento da evapotranspiração em telhados verdes e, conseqüentemente, avaliar o desempenho desses sistemas na gestão de águas pluviais.

O teste não-paramétrico de Wilcoxon pareado revelou haver diferença significativa entre a evapotranspiração dos módulos vegetados e a evaporação dos módulos não vegetados apenas nos meses de Julho de 2016 e Fevereiro de 2017 e para a estação de verão.

3.2.2 Evapotranspiração e evaporação mensal e sazonal

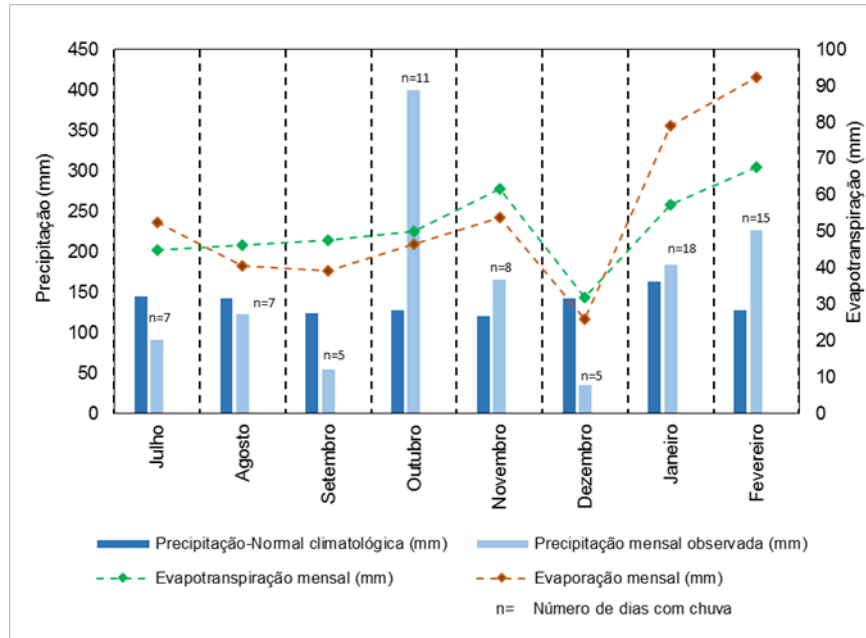
Para análise da evapotranspiração e evaporação mensal e sazonal, os dados diários, incluindo aqueles provenientes dos finais de semana e feriados, foram acumulados.

A Figura 15 mostra os acumulados mensais de chuva, de evapotranspiração e evaporação para o período de monitoramento, o número de dias com chuva (n) e a normal climatológica de precipitação. Ressalta-se, novamente, que os meses de Dezembro de 2016 e Janeiro de 2017, apresentaram 22 e 25 dias de observações e, portanto, o acumulado de chuva refere-se a esse período.

A partir da Figura 15, verificou-se que a porcentagem de precipitação mensal que retornou à atmosfera por evapotranspiração foi de 49,0% em Julho, 37,7% em Agosto, 87,1% em Setembro, 12,5% em Outubro, 37,2% em Novembro, 92,9% em Dezembro, 31,1% em Janeiro e 29,8% em Fevereiro.

Os meses com percentuais mais expressivos (Dezembro, Setembro e Julho) foram justamente aqueles em que tanto a frequência como o volume dos eventos de chuva foi menor, comparativamente aos demais meses, favorecendo o processo de evapotranspiração. Esses valores mostram que a evapotranspiração é um componente bastante variável, o que reflete na variabilidade da capacidade dos telhados verdes atuarem na retenção das chuvas.

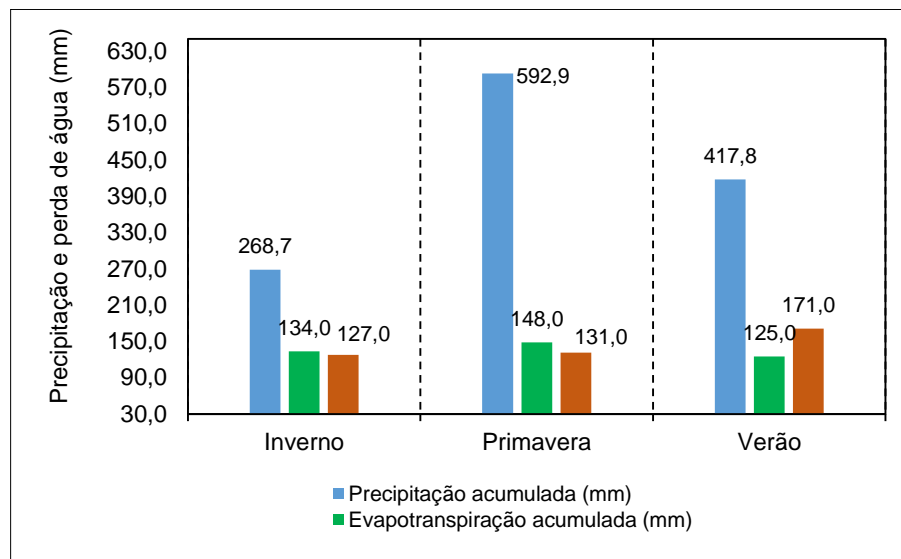
Figura 15 - Comportamento das precipitações, da evapotranspiração e evaporação nos meses monitorados, normal climatológica de precipitação e número de dias com chuva (n).



Fonte: A autora.

Quanto à análise sazonal, é possível observar (Figura 16) que a primavera apresentou o maior volume de evapotranspiração. Esse resultado, possivelmente, foi influenciado pelo maior número de dados computados (55 dias com dados válidos). No entanto, em termos percentuais, no inverno, 49,8% do que choveu, retornou à atmosfera por evapotranspiração. Na primavera esse valor foi de 25,0% e no verão de 29,9%. Isso reforça a ideia de que a evapotranspiração é influenciada pelo comportamento das precipitações, pois mesmo o inverno tendo apresentado as condições climatológicas (temperatura e radiação) mais desfavoráveis frente às demais estações, o volume evapotranspirado foi significativo. Neste sentido, o resultado sugere que o desempenho dos telhados verdes no controle quantitativo das águas pluviais pode ser comprometido em situações de chuvas frequentes e de grandes volumes. É preciso considerar que o período de estudo apresentou alta umidade relativa do ar e, portanto, essa condição pode ter influenciado no processo de evapotranspiração.

Figura 16 - Acumulados de chuva e de evapotranspiração e evaporação para as estações do ano.



Fonte: A autora.

Para todo o período de monitoramento, considerando o volume total precipitado, 47,0% correspondeu ao escoamento superficial, 32,0% foi evapotranspirado e 21,0% ficou armazenado nos módulos vegetados. Especificamente, com relação ao escoamento superficial, o valor obtido está de acordo com o resultado observado por Pessoa (2016) o qual verificou um coeficiente de escoamento (C) de 0,43 (43%) para telhados vegetados com *Sedum rupestre* e com espessura da camada de substrato de 70 mm. Além disso, a Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbaufll (FLL, 2002) apresenta a variação no valor do coeficiente de escoamento conforme a espessura da camada de substrato e a declividade do telhado verde. Para uma espessura entre 0,6 e 10,0 cm e uma inclinação de até 15°, o valor de C descrito pela norma é de 0,5, o qual é similar ao observado no presente trabalho.

Para os módulos não vegetados, do volume total de chuva, 43,0% correspondeu ao escoamento superficial, 34,0% foi evaporado e 23,0% ficou armazenado nos módulos. Esses resultados revelam que tanto módulos vegetados como não vegetados apresentaram desempenho muito semelhante no controle do escoamento, o que, provavelmente, foi consequência da pluviosidade significativa ocorrida no período de estudo. Essa constatação põe em dúvida os resultados de Berghage et al. (2007) e Voyde (2011) quanto à capacidade das plantas CAM em usar

a água rapidamente quando disponível. Ambos os autores avaliaram apenas a evapotranspiração de plantas suculentas. Deste modo, levanta-se a possibilidade de investigar outras espécies com taxas de evapotranspiração maiores, como plantas C₃ e C₄. Nagase e Dunnett (2012) observaram uma maior eficiência na redução do escoamento pluvial em telhados vegetados com gramíneas, seguido daqueles constituídos por herbáceas e sedum. No mesmo estudo, os autores também verificaram um escoamento de água maior nos módulos vegetados com sedum em comparação aos de substrato exposto.

4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com base no monitoramento de módulos experimentais de telhados verdes extensivos vegetados com *Sedum rupestre*, pôde-se concluir que:

- As taxas de evapotranspiração são, no decorrer dos dias, altamente variáveis e guardam dependência com as condições climatológicas, com a disponibilidade de água na camada de substrato e com a fase de desenvolvimento da vegetação;

- Após eventos chuvosos, as taxas de evaporação e evapotranspiração são elevadas, em função da disponibilidade de água no substrato. Ao longo de períodos secos ocorre um decaimento exponencial dessas taxas como consequência da menor disponibilidade hídrica;

- Os módulos vegetados produziram escoamento superficial (0,47) ligeiramente maior que os não vegetados (0,43). Acredita-se que, além do efeito de sombreamento proporcionado pela vegetação, o sistema radicular pouco profundo da *Sedum rupestre* e a característica intrínseca do gênero em perder pouca água possa ter inviabilizado uma maior recuperação da camada de substrato. Para pesquisas futuras, sugere-se investigar o comportamento da evapotranspiração utilizando espécies com diferentes estruturas anatômicas e características fisiológicas. Ademais, as características do substrato também podem influenciar no desenvolvimento e comportamento das plantas e, conseqüentemente, na perda de água por evapotranspiração. Assim, uma investigação de diferentes tipos e profundidades de substratos na resposta desta parcela do balanço hídrico em telhados verdes é outra lacuna a ser preenchida;

- Em termos percentuais, 49,8% da chuva ocorrida no inverno, retornou à atmosfera sob a forma de evapotranspiração. Para o verão esse valor foi de 29,9% e de 25,0% para a primavera. Esse resultado foi influenciado pela frequência e volumes

de chuva ocorridos nestas estações. A primavera e o verão foram as estações mais chuvosas, embora as condições climatológicas tenham sido favoráveis à perda de água por evapotranspiração. Neste sentido, o controle quantitativo do escoamento pluvial pelos telhados verdes pode ser comprometido quando os mesmos forem instalados em locais muito chuvosos ou sujeitos a grandes períodos de chuva;

Este trabalho atingiu o objetivo proposto ao determinar as taxas de evapotranspiração em telhados verdes, uma variável que, até o momento, se tem pouco conhecimento, mas que é de extrema importância quando se quer avaliar o papel das coberturas vegetadas no controle do escoamento superficial. Assim, incentiva-se a continuidade do monitoramento e o desenvolvimento de pesquisas nas diferentes regiões climáticas do Brasil, como forma de se obter uma melhor compreensão das tendências sazonais, anuais e geográficas da evapotranspiração. A partir dos avanços da pesquisa será possível regulamentar o uso e dar aplicabilidade aos telhados verdes como medida estrutural de gestão das águas pluviais urbanas.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper 56. 1998. Disponível em: <www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em: 02 mai. 2017.

APPEZZATTO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. **Anatomia Vegetal**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL. Banco de Dados. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_200.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2016.

BERGHAGE, R. D.; JARRET, A.; BEATTIE, D.; KELLEY, K.; HUSAIN, S.; REZAEI, F.; LONG, B.; NEGASSI, A.; CAMERON, R. **Quantifying evaporation and transpirational water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain**. National Decentralized Water Resources Capacity Development Project. Universidade da Pensilvânia, Pensilvânia, 2007

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, n.36, p. 351-360, dez. 2010.

BERRETTA, C.; POË, S.; STOVIN, V. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: the influence of vegetation and substrate characteristics. **Journal of Hydrology**, n. 511, p. 374-386, abr. 2014.

EUROPEAN ASSOCIATION OF NATIONAL METROLOGY INSTITUTES (EURAMET). **Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments**. Versão 3.0. 2011.

FELLER, M.; TRAVER, R.; WADZUK, B. Estimation of Green Roof Evaptranspiration – Experimental Results, **Low Impact Development: Redefining Water in the City**. 2010.

FLL. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. Guideline for the planning, execution and upkeep of green-roofs sites. Versão em Inglês. 2002.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. Selecting plants for extensive green roofs in the United States. Extension Bulletin E-3047. Jul. 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Estações automáticas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 01 jul. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Portaria INMETRO nº 236 de 22 de dezembro de 1994. Aprova o Regulamento Técnico Metrológico. 1994.

LORENZINI NETO, F. **Modelagem de telhado verde: uma análise da eficiência no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas**. 2014. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

KLAR, A. E. A. **Água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2 ed. São Paulo: Editora Nobel, 1998.

MARASCO, D. E.; HUNTER, B. N.; CULLIGAN, P. J.; GAFFIN, S. R.; MCGILLIS, W. R. Quantifying evapotranspiration from urban green roofs: a comparison of chamber measurements with commonly used predictive methods. **Environmental Science & Technology**, n. 48, p. 10273-10281, 2014.

NAGASE, A.; DUNNETT, N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. **Landscape and Urban Planning**, v.104, p. 356-363, mar. 2012.

PALMEIRA, N. A. **Balço de energia em telhado verde**. 2016. 97f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

PERSCH, C. G. **Avaliação da eficiência de um telhado verde no controle quantitativo do escoamento pluvial**. 2012. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

PESSOA, J. O. **Qualidade e quantidade de águas pluviais escoadas a partir de telhados verdes extensivos em Santa Maria-RS**. 2016. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

POE, S.; STOVIN, V.; BERRETTA, C. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 356-367, 2015.

RECIFE. Lei nº 18. 112 de 12 de Janeiro de 2015. Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências. **Diário Oficial Municipal**, Recife-PE, 13 de Janeiro de 2015.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004.

REZAEI, F. **Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species**. 2005. 167p. Tese (Mestrado em Ciência) – Universidade do Estado da Pensilvânia, Pensilvânia, 2005.

REZAEI, F.; JARRET, A. R.; BERGHAGE, R. D.; BEATTIE, D. J. Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species. **In: American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting**, 2005.

ROZA, F. A. **Alterações morfofisiológicas e eficiência de uso da água em plantas de *Jatropha curcas* L. submetidas à deficiência hídrica.** 2010. 78p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, 2010.

SANTA CATARINA. Lei nº 14.243 de 11 de Dezembro de 2007. Dispõe sobre a implementação de sistemas de naturezação através da criação de telhados verdes em espaços urbanos de Santa Catarina. **Diário Oficial do Estado de Santa Catarina**, 11 de Dezembro de 2007.

SÃO PAULO. Lei nº 16.277 de 05 de Outubro de 2015. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do “telhado verde” nos locais que especifica e dá outras providências. Dispõe da obrigatoriedade da instalação do “telhado verde” nos locais que especifica e dá outras providências. **Secretaria do Governo Municipal**, 05 de outubro de 2015.

SIA, M. E. **Evapotranspiration from extensive green roofs:** influence of climatological conditions, vegetation type, and substrate depth. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Western Ontario, Ontario, 2016.

SIMS, A. W.; et al. Retention performance of green roofs in three different climate regions. **Journal of Hydrology**. n. 542, p. 115, 2016.

SOULIS, K. X.; NTOULAS, N.; NEKTARIOS, P. A.; KARGAS, G. Runoff reduction from extensive green roofs having different substrate depth and plant cover. **Ecological Engineering**, n.102, p.80-89, 2017.

STOVIN, V.; VESUVIANO, G.; KASMIN, H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. **Journal of Hydrology**, p. 148-161, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D.G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n.1, p.139-154, jan./mar.2014.

UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE (UKAS). **In-house calibration and use of weighing machines**. Ed. 5. 2015.

VOYDE, E. A. **Quantifying the complete hydrologic budget for an extensive living roof.** 2011. 224p. Tese (Doutorado em Filosofia da Engenharia Civil) - Universidade de Auckland, Nova Zelândia, 2011.

VOYDE, E.; FASSMAN, E.; SIMCOCK, R.; WELLS, J. Quantifying evapotranspiration rates for New Zealand green roofs. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.6, n. 15, p. 395-403, jun. 2010.

CAPÍTULO II – PREDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM TELHADOS VERDES EXTENSIVOS VEGETADOS COM *Sedum rupestre*

RESUMO

Importantes benefícios dos telhados verdes no meio urbano estão associados com sua capacidade evapotranspirativa, como por exemplo, o controle do escoamento pluvial. A evapotranspiração atua recuperando o espaço de armazenamento de água disponível na camada de substrato, o que reflete na capacidade de retenção das precipitações. Tendo em vista a importância desse componente do balanço hídrico em telhados verdes, e dado o fato que a medição direta da evapotranspiração é, muitas vezes, inviável, esta pesquisa teve por objetivo verificar se modelos preditivos, tais como os oriundos da evapotranspiração agrícola, bem como os gerados com base nas variáveis climatológicas observadas no local e período de estudo, poderiam explicar a evapotranspiração ocorrida em telhados verdes. Os dados utilizados no estudo foram provenientes de um monitoramento experimental de seis módulos vegetados com *Sedum rupestre*, construídos na Universidade Federal de Santa Maria, RS. O período de monitoramento estendeu-se de Julho de 2016 a Fevereiro de 2017. Três módulos foram irrigados, retratando a evapotranspiração sob condições padrão, e os outros três não receberam irrigação, correspondendo à evapotranspiração sob condições não padrão. A partir do monitoramento desses seis módulos, os coeficientes de cultura (K_c) e de estresse hídrico (K_s) puderam ser determinados. O coeficiente de cultura médio de todo o período foi de 0,9 com valores que variaram de 0,5 a 1,4. Os maiores valores de K_c foram observados de Julho a Setembro, período este caracterizado pelo crescimento e aumento da biomassa vegetal e os menores verificados de Outubro a Dezembro de 2016, possivelmente em virtude da senescência das plantas. O K_s apresentou, em geral, valores próximos à unidade, com média de 0,9, o que sugere adequado suprimento de água para a cultura. Exceções foram verificadas nos meses de Setembro e Dezembro, os quais apresentaram baixos índices pluviométricos o que fez com que os módulos experimentassem uma condição de limitação hídrica. Verificou-se que os modelos de Penman-Monteith-FAO56, Penman, Jensen-Haise e Turc apresentaram as melhores performances na escala diária, sem incorporar os valores de K_c e K_s . Nestas condições, bons resultados, no entanto, foram verificados apenas nos meses de Julho, Agosto e Outubro do ano de 2016 e sazonalmente na estação do inverno. Quando a evapotranspiração estimada pelas equações clássicas foi corrigida com os coeficientes K_c e K_s , os ajustes tornaram-se substancialmente melhores e as equações de Penman, Slatyer-McIlroy e Priestley-Taylor tiveram ótimo desempenho, apresentando valores de NSE muito próximos a um e baixos valores de RMSE. As equações preditivas desenvolvidas a partir das variáveis climatológicas apresentaram bons resultados na predição da evapotranspiração observada nos meses de Julho, Agosto, Setembro, Outubro e Novembro do ano de 2016, Janeiro de 2017 e para o inverno. Como o período de monitoramento foi relativamente curto e atípico quanto ao comportamento das precipitações, entende-se ser necessária a continuidade do monitoramento como forma de verificar possíveis variações sazonais e anuais.

Palavras-chave: Variáveis climatológicas. Equações de estimativa. Coeficiente de cultura.

CHAPTER II - PREDICTION OF EVAPOTRANSPIRATION RATES IN EXTENSIVE GREEN ROOFS VEGETATED WITH *Sedum rupestre*

ABSTRACT

Important environmental benefits of green roofs in the urban areas are associated with their evapotranspirative capacity, such as rainfall control. Evapotranspiration acts by recovering the available water storage space in the substrate layer, which reflects in the rainfall retention capacity. Given the of this component in the water balance in green roofs, and due to the fact that the direct evapotranspiration measurement is often not feasible, this research aimed to verify if predictive models of evapotranspiration, such as those of agricultural purpose or even empirical models based on climatological variables, could explain evapotranspiration of green roofs. The data used in the study (from July 2016 to February 2017) were gathered from an experimental monitoring of six modules vegetated with *Sedum rupestre*, constructed at Federal University of Santa Maria, RS. Three modules were irrigated depicting evapotranspiration under standard conditions, and the other three non-irrigated, corresponding to evapotranspiration under non-standard conditions. From monitoring of these six modules, the crop coefficient (K_c) and water stress coefficient (K_s) were determined. The average K_c for the whole period was 0.9, ranging from 0.5 to 1.4. Highest values of K_c were observed from July to September, period characterized by the growth and increasing plant biomass, while the lowest K_c were verified from October to December 2016, possibly due to senescence of the plants. Values close to the unit were found for K_s with an average of 0.9, suggesting adequate water supply for the crop. Some exceptions were verified in months of September and December, which presented low rainfall volume, leading the modules to water stress conditions. It was the classical equations as Penman-Monteith-FAO56, Penman, Jensen-Haise and Turc presented good performances in the prediction of daily evapotranspiration, even without incorporating and K_c e K_s values. However, good results were only verified in July August and October-2016 and seasonally during the winter. When applying K_c and K_s coefficients to correct evapotranspiration, the prediction became substantially better and equations of Penman, Slatyer-McIlroy and Priestley-Taylor performed optimally, presenting NSE values very close to one and low RMSE values. Good results were also found for prediction of evapotranspiration in July, August, September, October and November of 2016, January 2017 and for winter, when empirical equations based on climatological variables were used. As the monitoring period was relatively short and atypical regarding precipitation behavior, it is understood that monitoring is necessary to verify possible seasonal and annual variations.

Keywords: Climatological variables. Estimating equations. Crop coefficient.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os telhados verdes vêm ganhando popularidade como uma medida de atenuação dos impactos ambientais associados à urbanização (IRGA et al., 2017). Estes sistemas são constituídos, basicamente, por uma camada de substrato e de vegetação (BERNDTSSON, 2010) e têm como função hidrológica imitar os processos naturais de interceptação, infiltração e evapotranspiração (STOVIN, VESUVIANO E KASMIN, 2012).

Importantes benefícios dos telhados verdes no meio urbano estão associados com sua capacidade evapotranspirativa (Digiovanni et al., 2013), tais como o conforto térmico no interior de edificações (JAFFAL, OULDBOUKHITINE E BELARBI, 2012), a redução de ilhas-de-calor (RAZZAGHMANESH, BEECHAM E SALEMI, 2016) e o controle do escoamento das águas pluviais (VOYDE et al. 2010).

Quanto ao controle do escoamento pelas coberturas vegetadas, principal interesse dos pesquisadores, a evapotranspiração atua recuperando o espaço de armazenamento de água na camada de substrato durante períodos secos para que as precipitações subsequentes sejam retidas (VOYDE et al., 2010; SIA, 2016). Para Carbone et al. (2016) a evapotranspiração é o componente do ciclo hidrológico de mais difícil quantificação devido à natureza dinâmica do conjunto solo-planta-atmosfera. No entanto, a mensuração dessa parcela do balanço hídrico em telhados verdes é fundamental para avaliar a resposta hidrológica e o impacto desses sistemas na gestão das águas pluviais (REZAEI, 2005).

A determinação direta da evapotranspiração, como por meio da lisimetria de pesagem, embora bastante precisa, é uma técnica cara e trabalhosa, o que a torna impraticável em algumas investigações de campo ou em projetos locais (SCHNEIDER, 2011). Assim, para superar esse problema é encorajado o uso de equações de estimativa da evapotranspiração, já que a maioria delas depende apenas de variáveis climatológicas, de mais fácil aquisição em estações de monitoramento, tais como temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar (SCUDERI, 2010; FELLER, 2011).

Embora grande parte das equações para estimativa da evapotranspiração tenham sido desenvolvidas para culturas agrícolas (VOYDE, 2011), nos últimos anos, um crescente grupo de pesquisadores têm buscado avaliar o comportamento dessas

equações na predição da evapotranspiração em telhados verdes (REZAEI, 2005; VOYDE, 2011; FELLER, 2011; SCHNEIDER, WADZUK e TRAVER, 2011; DIGIOVANNI et al., 2013; WADZUK et al., 2013; CARBONE et al., 2016). Os resultados são promissores, mas ainda não conclusivos e, portanto, existe a necessidade de maiores investigações tendo em vista que as equações de estimativa assumem pressupostos que, na maioria das vezes, não correspondem à realidade de telhados verdes, tais como: suficiente suprimento de água no solo e monoculturas saudáveis, cultivadas em grandes campos.

Um método consagrado na estimativa da evapotranspiração é o de Penman-Monteith-FAO56. Essa equação combina princípios de transferência de massa e equilíbrio energético, além de incorporar os efeitos de resistência da vegetação, o que a torna mais precisa em relação às demais e, portanto, é recomendada pela Food and Agriculture Organization-FAO como único método para determinação da evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

A equação de Penman Monteith-FAO56 é baseada numa cultura de referência, normalmente a grama, assumindo para a mesma uma altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência superficial de $0,70 \text{ s m}^{-1}$ (ALLEN et al., 1998). Ao estabelecer esse padrão, o método admite que a evapotranspiração é influenciada somente pela demanda atmosférica. Neste sentido, para que se possa determinar a evapotranspiração da cultura de interesse, a equação deve ser corrigida aplicando-se o coeficiente de cultura (K_c) e de estresse hídrico (K_s), os quais são determinados experimentalmente, sendo que ambos apresentam variabilidade temporal e espacial em função do estágio de desenvolvimento da vegetação e das condições de umidade no substrato (SCHNEIDER, 2011).

Embora a equação de Penman Monteith-FAO56 seja dotada de maior precisão, seu cálculo é bastante laborioso (SCHNEIDER, 2011). Além disso, dos oito parâmetros que compreendem o modelo, apenas a temperatura do ar pode ser obtida em qualquer estação climatológica (CARBONE et al., 2016). Deste modo, não deixa de ser útil a análise de equações mais simplificadas para a estimativa da evapotranspiração em telhados verdes, de modo a facilitar a manipulação por parte de projetistas e gestores públicos, na simulação de diferentes cenários e entendimento do papel dos telhados verdes no controle do escoamento pluvial.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo verificar se os modelos preditivos, tais como os oriundos da evapotranspiração agrícola, bem como equações

empíricas geradas com base nas variáveis climatológicas observadas no local e período de estudo, poderiam explicar a evapotranspiração ocorrida em telhados verdes vegetados com *Sedum rupestre*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção descreve os procedimentos metodológicos desenvolvidos para atingir o objetivo proposto no presente capítulo. Chama-se atenção para o fato de que a quantificação das taxas de evapotranspiração seguiu a metodologia já apresentada, detalhadamente, no Capítulo I. No entanto, optou-se por descrevê-la, novamente, de maneira breve, na subseção 2.1 como forma de facilitar a leitura, sem necessidade de retornar ao capítulo anterior.

2.1 QUANTIFICAÇÃO DAS TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIAS

As taxas de evapotranspiração diárias foram determinadas em campo, por meio de seis módulos experimentais de telhados verdes extensivos (Figura 17). O experimento foi instalado nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil e teve seu início em 01 de Julho de 2016 e término em 28 de Fevereiro de 2017.

Figura 17 - Módulos experimentais de telhados verdes extensivos instalados.



Fonte: A autora.

Os módulos, com área de 0,202 m², foram constituídos por bandejas de polipropileno, as quais receberam uma geomembrana drenante, comercialmente conhecida como MacDrain® 2L, que serviu como camada de drenagem. Sobre esta colocou-se uma manta geotêxtil como material filtrante que também envolveu as laterais das bandejas e por fim, o substrato numa espessura de 80 mm. Este, por sua vez, foi composto de solo (horizonte A de Argissolo Vermelho-Amarelo) coletado próximo à área experimental, vermiculita e condicionador de solo (MecPlant) nas proporções 3:1:1, respectivamente.

Os módulos foram vegetados com *Sedum rupestre*, sendo que a escolha foi em função da adaptabilidade que a planta tem demonstrado as condições climáticas locais, conforme observações feitas em estudos anteriores realizados na área experimental (PERSCH, 2012; TASSI et al., 2014; LORENZINI NETO, 2014). Além disso, o gênero *Sedum* é o mais utilizado em coberturas vegetadas em escala real e em pesquisas científicas em todo o mundo.

Para proporcionar a saída do excesso de água dos módulos, drenos de fundo foram instalados na parte inferior dos mesmos e conectados a recipientes de armazenamento (bombonas), com capacidade de 20 litros, apoiados ao solo.

Após o transplante, os módulos foram identificados e alocados a 1,24 m de altura em relação ao nível do solo. Uma inclinação de 1% em direção aos drenos garantiu o escoamento dos volumes de chuva excedentes dos módulos para as bombonas.

Os módulos foram tratados como microlisímetros de pesagem e, portanto, cada um deles era pesado, diariamente, em uma balança eletrônica com capacidade de 40 Kg e precisão de 2 g. Esse equipamento foi calibrado pelo Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos (LADIPP) da UFSM e os resultados do procedimento de calibração encontram-se no Apêndice A.

Como a precipitação e a drenagem representavam entrada e saída de água e, por consequência, alteravam o peso dos módulos, atentou-se para a quantificação dessas parcelas. A precipitação foi medida *in loco*, por meio da leitura de um pluviômetro. O volume de água proveniente da drenagem dos módulos e armazenado nas bombonas foi quantificado com o uso de provetas graduadas com capacidade de até 1000 mL.

Durante o período de 01 de Julho de 2016 até 15 de Outubro do mesmo ano, as pesagens foram realizadas às 16 horas. A partir do início do horário de verão, em

16 de Outubro de 2016, a rotina foi alterada para às 17 horas. A quantificação dos volumes precipitados e escoados se deu no mesmo horário de pesagem dos módulos.

Dos seis módulos vegetados mostrados na Figura 18, três foram irrigados (MV1, MV3, MV5), diariamente, sobre a própria balança, até cada módulo atingir valor próximo à capacidade de vaso, como forma de garantir disponibilidade suficiente de água para que as taxas de evapotranspiração sob condições padrão (ET_c) pudessem ser quantificadas. A capacidade de vaso correspondeu ao peso dos módulos após a sua saturação e posterior drenagem por 24 horas. O Apêndice B apresenta o peso de cada módulo na capacidade de vaso, sendo que o valor médio foi de, aproximadamente, 22 Kg. Os demais módulos (MV2, MV4 e MV6) não receberam irrigação, retratando assim, a evapotranspiração sob condições não padrão (ET_{c-adj}).

A rotina de monitoramento possibilitou resolver a equação 6 de balanço hídrico em telhados verdes apresentada na subseção 2.3.2 do Capítulo I. Salienta-se que o termo referente à irrigação só foi computado na equação de balanço para o caso dos módulos MV1, MV3, MV5.

As variáveis climatológicas de influência nas taxas de evapotranspiração e que também serviram de entrada para as equações empíricas de estimativa da evapotranspiração, foram obtidas junto ao acervo digital do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados disponibilizados no sistema correspondem aos registros da estação automática A-803, localizada a, aproximadamente 1,5 km da área experimental. Como comentado anteriormente, a precipitação foi monitorada *in loco*, contudo quando da impossibilidade de medições ou na ocorrência de falhas, recorreu-se aos dados do INMET.

2.2 PREDIÇÃO DAS TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIAS COM BASE NAS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS E EM EQUAÇÕES EMPÍRICAS

As equações clássicas de estimativa da evapotranspiração testadas nesta pesquisa foram selecionadas com base nos resultados apresentados por Medeiros (1998) e Ferreira et al. (2015). Esses autores compararam diferentes equações de estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Santa Maria - RS. A escolha dos modelos também considerou os trabalhos de Rezaei (2005), Feller (2011), Voyde (2011) e Wadzuk et al. (2013). Os autores confrontaram a evapotranspiração estimada pelas equações clássicas com os valores observados em

lisímetros de pesagem que simulavam telhados verdes. As expressões matemáticas que descrevem cada equação, juntamente com a fonte consultada, são apresentadas no Quadro 3, sendo que os procedimentos detalhados para determinar os componentes das equações de Penman e Penman-Monteith-FAO56 são descritos em Allen et al. (1998). É possível observar que alguns dos parâmetros empregados nessas duas equações também são dados de entrada para as demais.

Quadro 3 - Equações clássicas de estimativa da evapotranspiração de referência testadas.

Equação e fonte	Expressão matemática
Penman (Marasco et al., 2015)	$ET_0 = 0,408 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \right) \right] \quad (7)$
	$E_a = 2,6 (1 + 0,54u_2)(e_s - e_a) \quad (8)$
Penman-Monteith- FAO56 (Allen et al., 1998)	$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{méd} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (9)$
Priestley-Taylor (Wadzuk et al., 2013)	$\lambda ET_0 = 1,26 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \right] \quad (10)$
Slatyer-McIlroy (Wadzuk et al., 2013)	$\lambda ET_0 = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \right] \quad (11)$
Hargreaves-Samani (Wadzuk et al., 2013)	$ET_0 = 0,0023 \sqrt{T_{máx} - T_{mín}} (T_{méd} + 17,8) \left(\frac{R_a}{\lambda} \right) \quad (12)$
Camargo (Borges Jr. et al., 2012)	$ET_0 = R_a T_{méd} K D \quad (13)$
Jensen-Haise (Fernandes et al., 2010)	$ET_0 = \frac{R_s}{\lambda} (0,0252 T_{méd} + 0,078) \quad (14)$
Turc (Jesus, 2014)	$ET_0 = a_1 1,3 \cdot 10^{-2} \left(\frac{T_{méd}}{T_{méd+15}} \right) \left[\left(\frac{R_s}{0,0238846} + 50 \right) / \lambda \right] \quad (15)$
<p>E_a: termo referente ao poder de secagem do ar; ET₀: evapotranspiração de referência (mm d⁻¹); R_n: saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹); G: fluxo de calor da superfície do solo; γ: constante psicométrica (kPa °C⁻¹); Δ: declividade da curva de vapor de saturação (kPa °C⁻¹); u₂: velocidade do vento (m s⁻¹); λ: calor latente de vapor (MJ Kg⁻¹); e_s: pressão de vapor de saturação (kPa); e_a: pressão de vapor real (kPa); T_{máx}, T_{mín} e T_{méd}: a temperatura máxima, mínima e média, respectivamente; R_a: a radiação extraterrestre, a qual é uma função da latitude, declinação e distância relativa da Terra com base no dia Juliano; K: o fator de ajuste igual a 0,01, para T_a (temperatura média anual do local) até 23,5 °C; 0,0105 para T_a de 23,6 a 24,5 °C; 0,011 para T_a de 24,6 a 25,5 °C; 0,0115 para T_a de 25,6 a 26,5 °C; 0,012 para T_a de 26,6 °C a 27,5; 0,013 para T_a superior a 27,5 °C; D: a duração do período; R_s: radiação solar global (MJ m⁻² d⁻¹); a₁: o fator de umidade relativa. Para UR (%) maior ou igual a 50%, a₁=1. Se não, $a_1 = 1 + \frac{50 - UR_{méd}}{70}$.</p>	

Além da tentativa de prever a evapotranspiração por meio da aplicação de equações clássicas, verificou-se a possibilidade de estimar a perda de água em telhados verdes apenas com base no comportamento das variáveis climatológicas (temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa) observadas durante o período de estudo, por meio do desenvolvimento de equações empíricas de regressão. Incluiu-se na análise o déficit de pressão de vapor do ar (Δe), que corresponde à diferença entre a pressão de saturação de vapor (e_s) e a pressão real de vapor (e_a). Estes parâmetros foram calculados conforme as equações apresentadas no Apêndice C e descritas por Allen et al. (1998).

2.3 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CULTURA E DE ESTRESSE HÍDRICO

O coeficiente de cultura (K_c) diário para a *Sedum rupestre* foi determinado por meio da equação 16 (ALLEN et al., 1998).

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (16)$$

Sendo:

ET_c : a evapotranspiração diária em condições padrão, quantificada por meio dos módulos irrigados (mm d^{-1});

ET_0 : a evapotranspiração diária de referência determinada pela equação de Penman-Monteith-FAO 56 (mm d^{-1}).

O coeficiente de estresse hídrico (K_s) diário foi obtido empregando a equação 17, conforme Schneider, Wadzuk e Traver (2011) e Moraes (2013).

$$K_s = \frac{ET_{c-adj}}{ET_c} \quad (17)$$

Sendo:

ET_{c-adj} : a evapotranspiração diária em condições não padrão, quantificada por meio dos módulos não irrigados (mm d^{-1}).

2.4 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

2.4.1 Evapotranspiração diária observada

As taxas de evapotranspiração diária observadas em cada módulo foram agrupadas em termos de média. Assim, os módulos irrigados MV1, MV3 e MV5 representaram a média da evapotranspiração sob condições padrão, enquanto que a perda de água dos módulos não irrigados MV2, MV4 e MV6 representaram a média da evapotranspiração em condições não padrão.

Dias com dados duvidosos, tais como aqueles em que houve uma grande variabilidade na perda de água entre os módulos (verificados normalmente no dia posterior a um evento chuvoso) ou com falhas de medição foram eliminados do conjunto de dados. Também foram desconsiderados os valores acumulados decorrentes de finais de semana e feriados em que não houve pesagem dos módulos. Os valores foram organizados em planilha eletrônica e os resultados expressos sob a forma de gráficos e de estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, mínimos e máximos).

2.4.2 Equações preditivas da evapotranspiração

As variáveis climatológicas temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento também foram organizadas em planilha eletrônica. Os dados horários obtidos em Tempo Universal Coordenado (UTC) foram compatibilizados com o horário de Brasília e, posteriormente, transformados para a base diária procedendo a média horária, com exceção da radiação solar global, a qual teve os valores horários somados, resultando na radiação solar total incidente. Esse tratamento levou à obtenção das seguintes variáveis em um intervalo de tempo diário: Temperatura máxima média ($T_{\text{máx méd}}$); Temperatura mínima média ($T_{\text{mín méd}}$); Temperatura média ($T_{\text{méd}}$); Umidade relativa do ar máxima média ($UR_{\text{máx méd}}$); Umidade relativa do ar mínima média ($UR_{\text{mín méd}}$); Umidade relativa do ar média ($UR_{\text{méd}}$); Velocidade do vento média ($V_{\text{vméd}}$); Radiação solar global (Rad).

As variáveis climatológicas descritas e as taxas de evapotranspiração medidas foram relacionadas, por meio de análise de regressão linear múltipla do tipo *backward-stepwise*, com nível de significância de 5%, na tentativa de estabelecer equações

preditivas da evapotranspiração com base nas informações climatológicas do período de estudo. A qualidade do ajuste foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2_{ajustado}), sendo que quanto mais próximo de 1, mais explicativo é o modelo.

Previamente à análise de regressão, uma análise de correlação, por meio da matriz de correlação de Spearman, com nível de significância de 5%, foi realizada para identificar, de forma imediata, possíveis relações mútuas entre duas variáveis, ou seja, entre as taxas de evapotranspiração diárias e cada uma das variáveis climatológicas. A correlação foi considerada fraca se o valor do coeficiente de correlação (ρ) era menor que 0,5; moderada entre 0,5 - 0,8 e forte acima de 0,8 (DIGIOVANNI, 2013).

Quanto às equações clássicas de estimativa da evapotranspiração testadas, o equacionamento das mesmas se deu em planilha eletrônica. A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e pela Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). O coeficiente de Nash-Sutcliffe é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual quando comparado com a variação dos dados medidos (NASH e SUTCLIFFE, 1970). Este coeficiente varia de $-\infty$ a 1, sendo que valores entre 0 e 1 representam níveis aceitáveis de desempenho, enquanto que valores inferiores a zero indicam que a média dos dados observados prevê melhor o valor que a estimativa resultante do modelo, o que sugere desempenho inaceitável para o mesmo. Valores iguais a 1 indicam um ajuste perfeito (MORIASI et al. 2007). Para o RMSE, quanto mais próximo de zero estiver o valor resultante, mais os dados observados e estimados se assemelham (CHUNG, BOMBARDELLI e SCHLADOW, 2009). A análise considerou tanto a evapotranspiração estimada pelas equações sem correção com os coeficientes de cultura e de estresse hídrico como a incorporação ou correção das equações por estes coeficientes.

Tanto a predição da evapotranspiração diária pelas equações de regressão empíricas com base em variáveis climatológicas, quanto pelas equações clássicas consideraram os dados de evapotranspiração sob condições não padrão e de evapotranspiração sob condições padrão. As análises de correlação e regressão foram realizadas considerando cada mês de monitoramento, as estações do ano (inverno, primavera e verão) e o período total.

A partir dos dados de evapotranspiração medidos e da evapotranspiração de referência, calculada por Penman-Monteith-FAO56, foi possível estabelecer os

coeficiente de ajuste K_c e K_s para a *Sedum rupestre*. Os resultados desses coeficientes foram expressos na forma de gráficos e de estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, mínimos e máximos) considerando a escala mensal, sazonal e para todo o período de monitoramento.

As análises dos dados foram realizadas nos programas Action® 2.7 e Minitab® 17.0.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 TAXAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DIÁRIAS

Com a eliminação de dados duvidosos e daqueles decorrentes de dias não monitorados, chegou-se a um número de dias com dados válidos de evapotranspiração para cada período, os quais são mostrados entre parênteses na Tabela 5, juntamente com a estatística descritiva. Os valores são apresentados para a evapotranspiração sob condições padrão (ET_c) e sob condições não padrão (ET_{c-adj}). Ressalta-se que a evapotranspiração sob condições padrão é resultante da perda de água dos módulos MV1, MV3 e MV5 (irrigados), enquanto que a evapotranspiração sob condições não padrão foi obtida a partir dos módulos MV2, MV4 e MV6 (não irrigados).

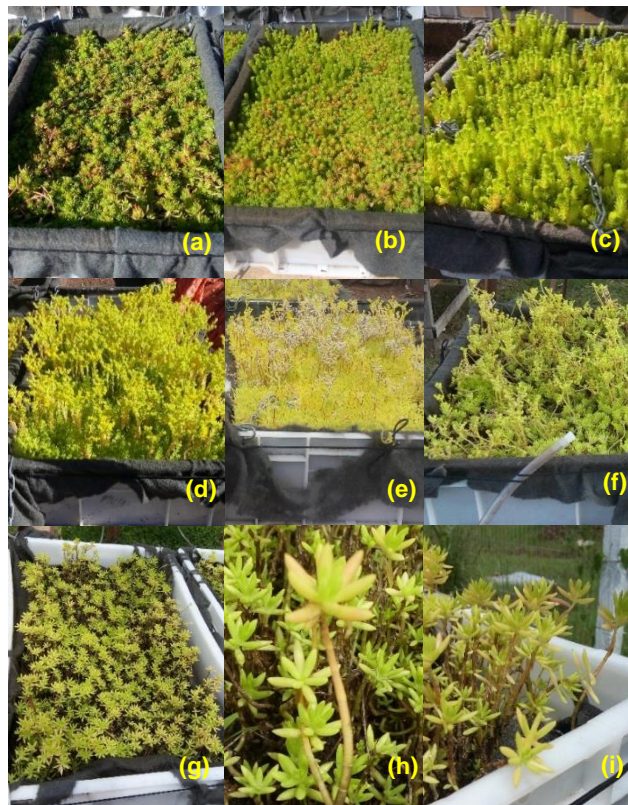
Tabela 5 - Estatística descritiva dos dados de evapotranspiração sob condições padrão e não padrão.

Período	Média (mm d ⁻¹)		Mediana (mm d ⁻¹)		Desvio padrão (mm d ⁻¹)		Máximo (mm d ⁻¹)		Mínimo (mm d ⁻¹)	
	ET_c	ET_{c-adj}	ET_c	ET_{c-adj}	ET_c	ET_{c-adj}	ET_c	ET_{c-adj}	ET_c	ET_{c-adj}
Julho (9)	1,9	1,8	1,8	1,5	1,1	1,1	4,3	4,3	0,5	0,5
Agosto (16)	2,6	1,9	2,5	1,9	0,9	0,9	3,8	3,1	1,1	0,4
Setembro (18)	3,5	2,4	3,6	2,9	0,7	1,4	4,6	4,4	2,0	0,3
Outubro (12)	2,3	2,3	2,4	2,7	0,8	1,4	3,3	4,1	0,7	0,2
Novembro (11)	2,7	2,3	2,5	1,6	0,9	1,3	4,6	4,4	1,4	1,0
Dezembro (14)	2,4	2,0	2,7	2,2	0,7	1,1	4,6	3,5	0,5	0,5
Janeiro (19)	2,7	2,6	2,8	2,7	1,2	0,9	4,6	4,1	0,5	0,8
Fevereiro (21)	3,6	3,2	3,6	3,1	1,1	0,8	6,7	5,1	2,0	1,9
Inverno (37)	2,7	2,3	2,6	2,1	1,0	1,1	4,6	4,4	0,5	0,4
Primavera (43)	2,7	2,0	2,6	1,7	0,9	1,3	4,6	4,4	0,5	0,2
Verão (40)	3,2	2,9	3,3	2,9	1,2	0,9	6,7	5,1	0,5	0,8
Todo período (120)	2,8	2,4	2,8	2,6	1,1	1,2	6,7	5,1	0,5	0,2

Fonte: A autora.

Conforme revela a mediana, em virtude da constante disponibilidade de água, as perdas por evapotranspiração sob condições padrão foram superiores à evapotranspiração sob condições não padrão em praticamente todos os períodos analisados, sendo a única exceção o mês de Outubro de 2016. Nesse mês ocorreram grandes volumes de chuva (no total de 400 mm), o que levou a uma mudança no aspecto da vegetação, que passou a apresentar uma coloração amarelada. Essa constatação foi mais evidente nos módulos irrigados. Nesse sentido, é provável que as plantas experimentaram uma condição de encharcamento, o que desencadeou na senescência no mês de Novembro, com uma significativa redução da biomassa vegetal e folhas remanescentes restritas ao ápice do caule. Em função disso, do mês de Dezembro de 2016 em diante, uma maior exposição do substrato foi observada, sobretudo nos módulos irrigados, o que justifica as altas taxas de evapotranspiração ocorridas nesse período. A Figura 18 mostra o aspecto da *Sedum rupestre* durante os meses de estudo.

Figura 18 - Mudança no aspecto da *Sedum rupestre* durante os meses de estudo. (a) Julho. (b) Agosto. (c) Setembro. (d) Outubro. (e) Novembro. (f) Dezembro. (g) Janeiro e Fevereiro. (h-i) Destaque para a ausência de folhas no prolongamento do caule.



Na tentativa de preservar as plantas, o critério de irrigação passou a considerar, a partir do início de Novembro de 2016, o volume médio de evapotranspiração diária, ou seja, 0,5 L (correspondente a uma taxa média de evapotranspiração de 2,7 mm d⁻¹ observada até o mês de Outubro de 2016). Assim esse volume era repostado diariamente, salvo os dias em que ocorria precipitação.

3.2 PREDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM BASE EM EQUAÇÕES DE REGRESSÃO COM VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS

As matrizes de correlação de Spearman foram realizadas considerando a evapotranspiração sob condições padrão e a evapotranspiração sob condições não padrão, ambas analisadas na escala mensal, sazonal e para todo o período de monitoramento (8 meses). O Quadro 4 apresenta os resultados referentes aos períodos em que foram observadas correlações moderadas (M) e fortes (F). Detalhamento maior pode ser obtido nas Tabelas dos Apêndices D e E.

Quadro 4 - Resultado das correlações entre a evapotranspiração com as variáveis climatológicas, onde M e F significa correlação moderada e forte, respectivamente.

Evapotranspiração sob condições padrão (ET _c)				
Inverno	Agosto/2016	Setembro/2016	Janeiro/2017	
-Temperatura (M) -Radiação (M) -Déficit de vapor (M)	-Umidade relativa (M) -Radiação (M) -Déficit de vapor (M)	-Temperatura (M)	-Umidade relativa (M) -Radiação (M)	
Evapotranspiração sob condições não padrão (ET _{c-adj})				
Inverno	Julho/2016	Agosto/2016	Outubro/2016	Janeiro/2017
- Temperatura (M) - Radiação (M) - Déficit de vapor (M)	- Umidade relativa (F) - Vento (M) - Déficit de vapor (F)	- Umidade relativa (M) - Radiação (M) - Déficit de vapor (M) - Vento (M)	-Radiação (M)	-Umidade relativa (M) -Radiação (M)

As correlações entre as taxas de ET e a umidade relativa são inversamente proporcionais

Fonte: A autora.

Para a maioria dos períodos analisados, as correlações foram de fracas a moderadas. Apenas no mês de Julho de 2016 correlações fortes foram observadas entre a evapotranspiração sob condições não padrão e a umidade relativa e entre a evapotranspiração não padrão e o déficit de pressão de vapor. Resultado semelhante também foi observado por Voyde (2011), avaliando módulos experimentais de telhados verdes sob condições de campo. O autor verificou correlações de fracas a

moderadas entre a evapotranspiração e as variáveis climatológicas e acredita que em condições reais a influência de fatores climáticos individuais seja perdida em função da interação entre todas as variáveis.

Da mesma forma que para a análise de correlação, a regressão linear múltipla (*stepwise*) entre os dados de evapotranspiração diários e as variáveis climatológicas, considerou a condição não irrigada (ET_{c-adj}) e irrigada (ET_c) sendo esta análise realizada na escala mensal, sazonal e para todo o período de monitoramento.

É possível verificar (Tabela 6) que, para todo o período de monitoramento, bem como para primavera e os meses de Dezembro de 2016 e Janeiro de 2017 os modelos não são capazes de prever, com confiança, as taxas de evapotranspiração. Para o verão, Setembro de 2016 e Fevereiro de 2017 o método removeu todos os termos do modelo. Somente para o inverno e os meses de Julho, Agosto, Outubro e Novembro de 2016 a evapotranspiração é bem explicada pelas variáveis preditoras.

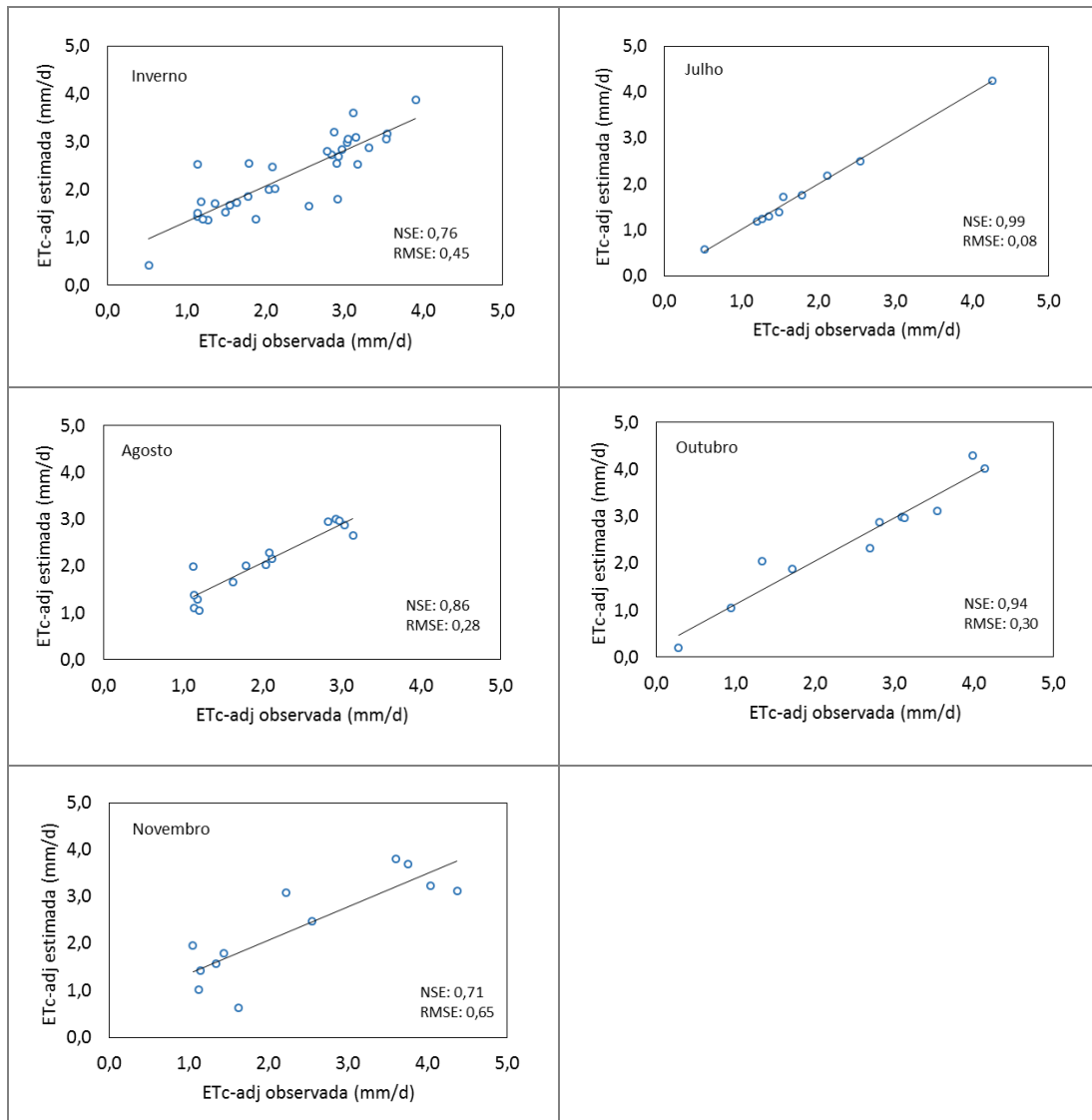
Tabela 6 - Equações de regressão geradas para a predição da evapotranspiração em condições não padrão.

Período	Equação	R ² _{aj.} (%)
Todo período	$ET_{c-adj} = 1,011 + 0,0775 T_{\min \text{ média}}$	12
Inverno	$ET_{c-adj} = 4,99 + 0,0659 T_{\max \text{ média}} - 0,0614 UR_{\max \text{ média}} + 0,1097 Rad$	76
Primavera	$ET_{c-adj} = -7,48 - 2,786 T_{\max \text{ média}} + 2,862 T_{\min \text{ média}} + 0,540 UR_{\max \text{ média}} - 0,458 UR_{\min \text{ média}} + 0,0934 Rad$	37
Julho	$ET_{c-adj} = -5,03 - 2,090 T_{\max \text{ média}} + 2,061 T_{\min \text{ média}} + 0,3149 UR_{\max \text{ média}} - 0,2445 UR_{\min \text{ média}} + 0,0889 Rad + 4,119 \Delta e$	98
Agosto	$ET_{c-adj} = 5,36 - 0,0658 UR_{\max \text{ média}} + 0,1661 Rad$	65
Outubro	$ET_{c-adj} = -11,38 - 2,496 T_{\max \text{ média}} + 2,745 T_{\min \text{ média}} + 1,225 UR_{\max \text{ média}} - 1,189 UR_{\min \text{ média}} + 0,1115 Rad$	91
Novembro	$ET_{c-adj} = -30,88 + 1,398 UR_{\max \text{ média}} - 1,199 UR_{\min \text{ média}} + 1,8 + 0,1854 Rad$	54
Dezembro	$ET_{c-adj} = -3,38 + 0,0805 UR_{\min \text{ média}}$	42
Janeiro	$ET_{c-adj} = 0,885 + 0,0782 Rad$	23

Fonte: A autora.

A Figura 19 mostra as retas de ajuste que comparam as taxas de evapotranspiração sob condições não padrão observadas e as estimadas pelas equações de regressão, bem como o erro associado.

Figura 19-Evapotranspiração sob condições não padrão medida vs evapotranspiração estimada.



Fonte: A autora.

Na Tabela 7, são apresentadas as equações geradas com base na evapotranspiração sob condições padrão. Os modelos são capazes de prever, com confiança, as taxas de evapotranspiração apenas nos meses de Julho, Agosto e Setembro de 2016 e Janeiro de 2017. Para o verão, primavera, Outubro e Novembro de 2016, o método removeu todos os termos do modelo.

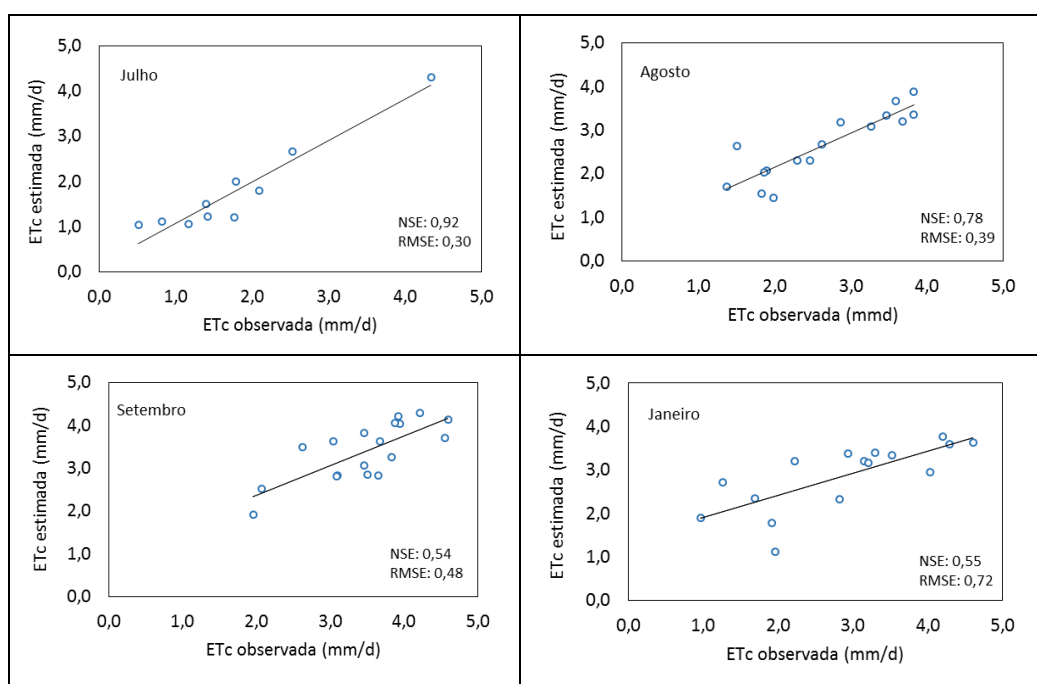
Tabela 7 - Equações de regressão geradas para a predição da evapotranspiração em condições padrão.

Período	Equação	R ² _{aj.} (%)
Todo o período	$ET_c = 1,678 + 0,0554 T_{máx\ média}$	6
Inverno	$ET_c = 3,38 + 0,0834 T_{máx\ média} - 0,0415 UR_{máx\ média} + 0,1042 Rad$	47
Julho	$ET_c = -15,54 + 0,694 UR_{máx\ média} - 0,553 UR_{mín\ média} + 0,866 Vento + 4,34 \Delta e$	85
Agosto	$ET_c = 3,17 + 0,1204 T_{máx\ média} - 0,0526 UR_{mín\ média} + 0,1372 Rad$	73
Setembro	$ET_c = 13,44 + 0,1419 T_{máx\ média} - 0,389 UR_{máx\ média} + 0,278 UR_{mín\ média} - 0,861 Vento$	57
Dezembro	$ET_c = -2,19 + 0,0621 UR_{máx\ média}$	39
Janeiro	$ET_c = -1,752 + 0,1802 Rad$	63
Fevereiro	$ET_c = -22,4 + 0,247 UR_{máx\ média} + 9,53 \Delta e$	24

Fonte: A autora.

A Figura 20 mostra as retas de ajustes que comparam as taxas de evapotranspiração sob condição padrão medidas e as estimadas pelas equações de regressão.

Figura 20 - Evapotranspiração sob condições padrão medida vs evapotranspiração estimada.



É possível observar que para ambas situações, ou seja, tanto para módulos irrigados como não irrigados, os modelos puderam ser estabelecidos para apenas alguns períodos. O vento foi a variável meteorológica de menor representatividade, enquanto que a umidade relativa foi incluída em praticamente todos os modelos, o que sugere que este seja um parâmetro explicativo importante das taxas de evapotranspiração.

Ao contrário deste estudo, Rezaei (2005) obteve bons ajustes para os modelos gerados para todas as estações do ano estudadas. No entanto, o autor avaliou o comportamento da evapotranspiração em condições climáticas controladas em estufa. Em condições de campo, como foi o caso do presente trabalho, as interações entre os fatores climatológicos e as taxas de evapotranspiração muito provavelmente são mais complexas e outros fatores, além das variáveis climatológicas e da disponibilidade hídrica, acabaram interferindo no processo.

3.3 COEFICIENTE DE CULTURA E DE ESTRESSE HÍDRICO

A Tabela 8 apresenta a estatística descritiva para os coeficientes de cultura e de estresse hídrico para a *Sedum rupestre* observados no período de estudo.

Tabela 8 - Estatística descritiva para os coeficientes K_c e K_s .

Período	Média		Mediana		Desvio padrão		Máximo		Mínimo	
	K_c	K_s	K_c	K_s	K_c	K_s	K_c	K_s	K_c	K_s
Julho	1,3	0,9	1,3	1,0	0,4	0,1	1,8	1,0	0,7	0,8
Agosto	1,4	0,7	1,5	0,8	0,3	0,2	1,8	0,9	0,5	0,4
Setembro	1,2	0,7	1,3	0,9	0,3	0,4	1,7	1,6	0,5	0,1
Outubro	0,7	1,1	0,6	1,2	0,3	0,6	1,1	1,8	0,3	0,1
Novembro	0,6	0,9	0,5	1,0	0,2	0,4	0,9	1,5	0,3	0,3
Dezembro	0,5	0,8	0,5	0,8	0,2	0,3	0,9	1,2	0,1	0,2
Janeiro	0,6	1,0	0,6	1,0	0,2	0,2	0,9	1,5	0,2	0,2
Fevereiro	0,9	0,9	0,9	0,9	0,3	0,1	1,8	1,2	0,5	0,6
Inverno	1,3	0,9	1,4	0,9	0,3	0,2	1,8	1,6	0,5	0,4
Primavera	0,7	0,8	0,6	0,9	0,3	0,5	1,3	1,8	0,1	0,1
Verão	0,8	1,0	0,7	0,9	0,3	0,2	1,8	1,5	0,2	0,6
Todo período	0,9	0,9	0,8	0,9	0,4	0,3	1,8	1,8	0,1	0,1

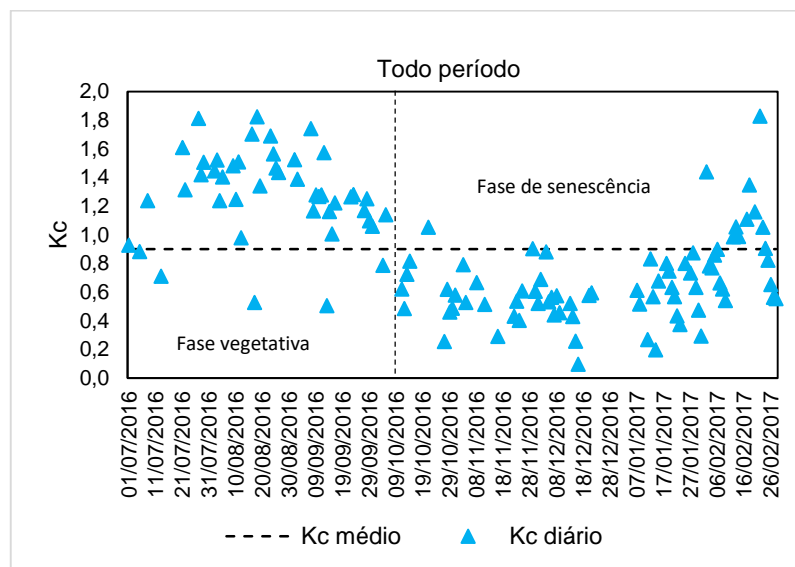
Fonte: A autora.

A Figura 21 permite visualizar o comportamento do K_c diário. Como se observa, os valores foram maiores nos três primeiros meses de monitoramento (Julho, Agosto e Setembro de 2016). Esse período se caracterizou pela fase vegetativa ou de

crescimento das plantas. Ressalta-se que após o transplante, esperou-se um mês para dar início ao monitoramento, portanto, os valores de K_c iniciais não puderam ser determinados.

A partir da floração, que teve seu início em Outubro de 2016, os valores de K_c tiveram uma tendência de queda que se manteve com a senescência vegetal, iniciada em Novembro de 2016. O ligeiro aumento de K_c entre os meses de Janeiro e Fevereiro de 2017 foi, possivelmente, em função da maior exposição do substrato a qual aumentou a parcela de evaporação.

Figura 21 - Valores de K_c diários observados durante o monitoramento.



Fonte: A autora.

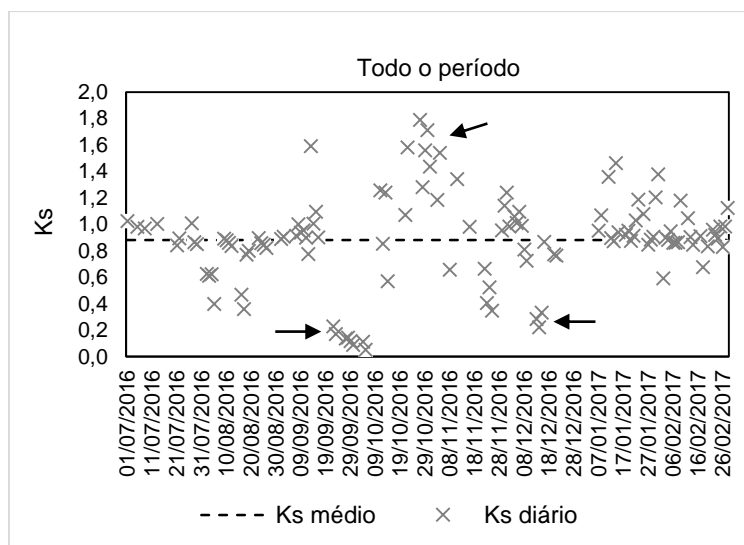
O coeficiente de cultura médio para todo o período foi de 0,9, com valores variando de 0,5 a 1,4, os quais ficaram dentro da faixa de variação encontrada por Schneider, Wadzuk e Traver (2011). Os autores avaliaram a evapotranspiração de uma composição de *Sedum* em condições de campo e, a partir disso, obtiveram K_c da ordem de 1,4 e de 1,3 para o ano de 2009 e 2010, respectivamente. Voyde (2011) determinou, para as condições de outono, um coeficiente de cultura de 1,01 para a espécie *Disphyma australe* e de 0,85 para a *Sedum mexicanum*. Conforme o autor, valores de K_c igual a 1 podem não ser realistas para telhados verdes, pois sugerem que as espécies utilizadas em coberturas vegetadas (normalmente plantas CAM) são capazes de transpirar às mesmas taxas que a grama ou a alfafa (plantas C_3). Starry

et al. (2016) obtiveram valores menores que variaram de 0,21 a 0,50 para a espécie *Sedum album*, de 0,25 a 0,71 para a *Phedimus Kamtschaticus* e de 0,22 a 0,55 para *Sedum sexagulare*.

Os altos valores de K_c observados no presente estudo assim como no trabalho de Schneider, Wadzuk e Traver (2011) possivelmente seja em função do fluxo de calor na borda dos módulos. Desta forma, em áreas vegetadas menores, é possível verificar K_c da ordem de 1,9 a 2,3 (ALLEN et al., 1996 apud SCHNEIDER, 2011).

Assim como K_c , os valores de K_s (Figura 22) também apresentaram variabilidade (variação entre 0,1 a 1,8), mas em média ficaram próximos à unidade (valor médio de todo período de 0,9), o que significa que a cultura não sofreu estresse hídrico na maioria do tempo (HOEKSTRA et al., 2011; MARTIN, 2008). A maior dispersão (indicada pelas setas na Figura 22) pode ser observada entre os meses de Setembro e Dezembro de 2016. O final de Setembro e meados de Dezembro apresentaram alguns dias de estiagem e a vegetação pode ter experimentado uma situação de escassez de água. Por outro lado, Outubro foi marcado por grandes volumes de chuva, o que fez aumentar os valores de K_s . Schneider, Wadzuk e Traver (2011) verificaram K_s médio de 0,9 e de 0,8 para o ano de 2009 (ano úmido) e 2010 (ano seco), respectivamente.

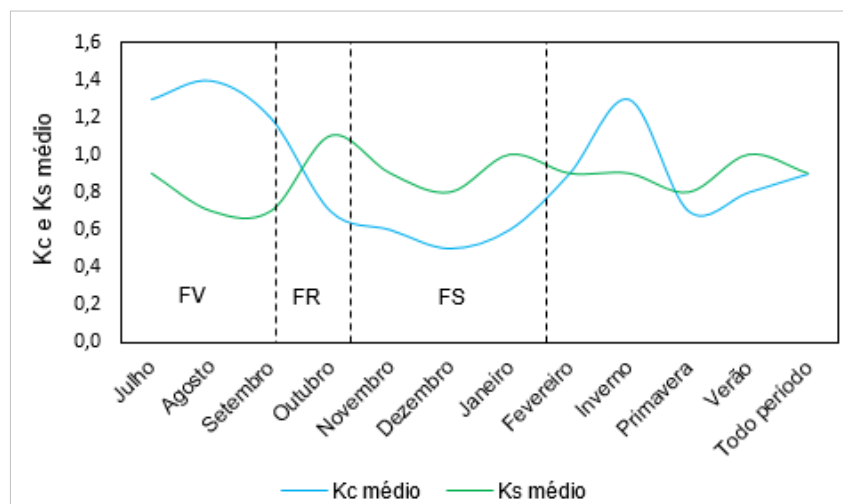
Figura 22 - Valores de K_s diários observados durante o monitoramento.



Fonte: A autora.

A Figura 23 mostra o comportamento de K_c e K_s com base nas médias mensais e sazonais. Os valores observados nesse estudo servem como uma tentativa preliminar de estabelecer tais coeficientes para a previsão da evapotranspiração em telhados verdes. O refinamento e validação desses valores exige um período de monitoramento mais longo, que contemple todas as fases de desenvolvimento da *Sedum rupestre*. Além disso, com base nos resultados, é muito provável que esses coeficientes, sobretudo o K_s , variem de ano para ano, em função da variabilidade climática, como por exemplo do comportamento das precipitações.

Figura 23 - Comportamento de K_c e K_s médio mensal e sazonal.



FV: Fase vegetativa; FR Fase reprodutiva; FS: Fase de Senescência.

Fonte: A autora.

3.4 PREDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM BASE EM EQUAÇÕES CLÁSSICAS DE ESTIMATIVA

A qualidade do ajuste entre as taxas de evapotranspiração medidas e as estimadas pelas equações clássicas em base diária foi analisada por meio do coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe (NSE) e pela Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

As comparações entre os valores diários estimados e os observados para cada período sem incorporar os coeficientes de cultura e de estresse hídrico estão apresentadas nos Apêndices F e G. A Tabela 9 resume os modelos que geraram os maiores valores de NSE e os menores valores de RMSE. Entre as equações, apenas Penman-Monteith-FAO56, Penman, Jensen-Haise e Turc apresentaram valores

razoáveis de NSE e RMSE (destacados na tabela). No entanto isso foi observado somente nos meses de Julho, Agosto e Outubro de 2016 e para o inverno.

Tabela 9 - Resultado dos ajustes entre as taxas de evapotranspiração observadas e as estimadas.

Evapotranspiração sob condições padrão (ET _c)			
Período	Equação	NSE	RMSE
Julho/2016	Penman-Monteith-FAO56	0,67	0,58
	Penman	0,83	0,42
	Jensen-Haise	0,41	0,78
Agosto/2016	Jensen-Haise	0,58	0,56
	Priestley-Taylor	0,29	0,74
Janeiro/2017	Turc	0,21	1,03
Inverno	Penman-Monteith-FAO56	0,10	0,96
	Priestley-Taylor	0,18	0,92
	Jensen-Haise	0,28	0,86
Evapotranspiração sob condições não padrão (ET _{c-adj})			
Julho/2016	Penman-Monteith-FAO56	0,75	0,50
	Penman	0,85	0,39
	Jensen-Haise	0,44	0,76
Agosto/2016	Penman-Monteith-FAO56	0,31	0,69
	Priestley-Taylor	0,42	0,63
	Slatyer-McIlroy	0,35	0,67
	Turc	0,27	0,71
Outubro/2016	Turc	0,50	0,94
Inverno	Penman-Monteith-FAO56	0,47	0,77
	Priestley-Taylor	0,35	0,85
	Slatyer-McIlroy	0,10	1,00
	Jensen-Haise	0,18	0,96

Fonte: A autora.

Quando considerado a evapotranspiração sob condições não padrão era de se esperar que os ajustes fossem fracos, pois as equações de estimativa foram formuladas com base em superfícies vegetadas com suficiente disponibilidade hídrica. Contudo, nem mesmo a evapotranspiração sob condições padrão apresentou bons resultados. Neste sentido, é provável que outros fatores, como a pequena escala dos módulos e a condição da vegetação tenham exercido algum tipo de influência. Ademais, a determinação da evapotranspiração sob condições padrão requer condições de cultivo ideais, o que, na prática, é bastante difícil de atender. Essas condições envolvem adequado suprimento de água, cobertura vegetal uniforme e adequada fertilização do substrato.

Resultados poucos satisfatórios também foram observados por Voyde (2011). Das dez equações testadas pelo autor, somente a de Penman-FAO 24, a qual não foi

testada no presente trabalho, apresentou uma correlação moderada com os dados medidos. O autor avaliou o desempenho das equações com base apenas nos dias em que os módulos apresentavam disponibilidade de água. Wadzuk et al. (2013) não conseguiram estabelecer um modelo ideal para a estimativa da evapotranspiração diária com base na avaliação das equações de Blaney-Criddle, Hargreaves, Priestley-Taylor, Slatyer-McIlroy e Penman-Monteith-ASCE. No entanto, resultados um pouco mais razoáveis foram observados ao comparar os dados medidos com os estimados por Penman-Monteith-ASCE. Os dados eram oriundos de dias com e sem chuva, portanto não retratavam uma condição de evapotranspiração sob condições padrão, o que justifica a baixa capacidade preditiva das equações. Diferentemente, Rezaei (2005) obteve bons valores de R^2 para os modelos testados. A equação de Penman-Monteith, por exemplo, resultou em um coeficiente de determinação de, aproximadamente, 0,8. Contudo, o estudo foi conduzido em escala de laboratório, onde as condições climatológicas e de saúde da planta eram devidamente controladas.

Os coeficientes de cultura e de estresse hídrico diários foram incorporados aos valores de evapotranspiração estimados pelas equações clássicas, e a partir disso, observou-se que os ajustes tornaram-se substancialmente melhores, sendo que os modelos de Slatyer-McIlroy, Penman e Priestley-Taylor apresentaram ótimo desempenho em praticamente todos os períodos avaliados. A Tabela 10 apresenta os resultados da comparação entre a evapotranspiração sob condições não padrão e a evapotranspiração estimada e corrigida com os valores de K_c e K_s . A comparação entre a evapotranspiração sob condições padrão e a evapotranspiração estimada e corrigida apenas com K_c é apresentada no Apêndice H.

Tabela 10 - Comparação entre ET_{c-adj} vs ET_0 corrigida com K_c e K_s .

(continua)

Período	Equação	NSE	RMSE
Julho/2016	Penman	0,88	0,35
	Jensen-Haise	0,32	0,84
Agosto/2016	Priestley-Taylor	0,79	0,38
	Camargo	0,36	0,67
	Jensen-Haise	0,14	0,77
	Slatyer-McIlroy	0,94	0,21
	Turc	0,87	0,30
Setembro/2016	Penman	0,86	0,49
	Priestley-Taylor	0,75	0,68
	Camargo	0,50	0,98
	Jensen-Haise	0,25	0,98
	Slatyer-McIlroy	0,73	0,72
Outubro/2016	Turc	0,51	0,96
	Penman	0,85	0,52
	Priestley-Taylor	0,82	0,56
	Camargo	0,66	0,77
	Jensen-Haise	0,59	0,86
	Slatyer-McIlroy	0,98	0,19
Novembro/2016	Turc	0,76	0,57
	Penman	0,84	0,51
	Priestley-Taylor	0,82	0,54
	Camargo	0,48	0,91
	Jensen-Haise	0,54	0,85
Dezembro/2016	Slatyer-McIlroy	0,99	0,15
	Turc	0,73	0,66
	Penman	0,84	0,51
	Priestley-Taylor	0,82	0,54
	Camargo	0,48	0,91
Janeiro/2017	Jensen-Haise	0,54	0,85
	Slatyer-McIlroy	0,99	0,15
	Turc	0,73	0,66
	Penman	0,70	0,46
	Priestley-Taylor	0,30	0,74
Fevereiro/2017	Camargo	0,48	0,64
	Slatyer-McIlroy	0,99	0,07
	Turc	0,47	0,65
	Penman	0,60	0,49
Inverno	Camargo	0,37	0,62
	Penman	0,63	1,07
	Priestley-Taylor	0,51	0,74
	Camargo	0,20	0,94
	Jensen-Haise	0,20	0,94
	Slatyer-McIlroy	0,50	0,75
Primavera	Turc	0,34	0,86
	Penman	0,88	0,44
	Priestley-Taylor	0,85	0,49
	Camargo	0,73	0,66
	Jensen-Haise	0,61	0,79
	Slatyer-McIlroy	0,98	0,16
	Turc	0,78	0,60

Tabela 10 – Comparação entre ET_{c-adj} vs ET_0 corrigida com K_c e K_s .

Período	Equação	NSE	(conclusão)
			RMSE
Verão	Penman	0,72	0,48
	Priestley-Taylor	0,19	0,80
	Camargo	0,50	0,63
	Slatyer-McIlroy	0,99	0,10
Todo período	Penman	0,63	0,71
	Priestley-Taylor	0,65	0,68
	Camargo	0,58	0,75
	Slatyer-McIlroy	0,86	0,43
	Turc	0,59	0,74

Fonte: A autora.

Os resultados sugerem que estes modelos podem ser utilizados para estimar a evapotranspiração ocorrida em telhados verdes, auxiliando na realização de previsões e cenários, desde que a evapotranspiração estimada pelas equações seja corrigida com os coeficientes associados à cultura, neste caso da *Sedum rupestre*. A equação de Penman, de acordo com Rezaei (2005) costuma apresentar resultados bastante satisfatórios, porém exige como dados de entrada um número considerável de parâmetros climatológicos, como umidade do ar, temperatura, radiação e velocidade do vento. Os modelos de Slatyer-McIlroy e de Priestley-Taylor são derivações de Penman, entretanto assumem que a evapotranspiração ocorre com mínimo efeito de advecção e que o ar acima da superfície evapotranspirante é saturado de vapor (FELLER, 2011). Como o período de estudo foi caracterizado por alta umidade relativa do ar, acredita-se que essas equações puderam expressar adequadamente as perdas de água por evapotranspiração. Entende-se ser necessário, no entanto, um período de monitoramento mais longo, a fim de avaliar tendências sazonais e anuais na evapotranspiração e obter uma maior certeza quanto a esses resultados e quanto ao desempenho de outros modelos ainda mais simples.

4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados pôde-se concluir que:

- As taxas de evapotranspiração sob condições padrão (módulos irrigados) são superiores às de evapotranspiração sob condições não padrão (módulos não irrigados), havendo relação entre as perdas de água por evapotranspiração e a umidade na camada de substrato;

- Referente as equações clássicas de estimativa da evapotranspiração, as equações com desempenho razoáveis, considerando a escala diária, foram de Penman-Monteith-FAO56, Penman, Jensen-Haise e Turc, apenas para alguns períodos avaliados e sem incorporar os valores de K_c e K_s . Contudo, bons resultados foram obtidos, em todos os períodos analisados, quando tais coeficientes foram utilizados para corrigir a evapotranspiração de referência. Os modelos de Penman, Slatyer-McIlroy e Priestley-Taylor geraram os melhores ajustes, demonstrando, portanto, potencial de aplicabilidade para estimar a evapotranspiração em telhados verdes quando da impossibilidade de medições diretas. A extrapolação dessas equações para outros períodos ou regiões climáticas requer mais estudos;

- As equações de regressão baseadas nas variáveis climatológicas não apresentaram um bom ajuste em todos os períodos avaliados. Esses resultados mostram que a modelagem da evapotranspiração especificamente para telhados verdes é bastante complexa e precisa ser melhor investigada;

- Os coeficientes de cultura e de estresse hídrico encontrados para a *Sedum rupestre* estão de acordo com os valores apresentados na literatura, porém um período de monitoramento mais longo é necessário, como forma de se ter maior certeza desses valores já que eles são variáveis em função da fase de desenvolvimento da vegetação e do comportamento climático;

Para trabalhos futuros sugere-se instalar os microlisímetros junto a telhados verdes em grande escala, como forma de minimizar os efeitos de fluxo por advecção de calor e tornar os resultados mais precisos. Além disso, um monitoramento contínuo, de preferência com quantificação automatizada das parcelas do balanço hídrico e com estação climatológica *in loco*, pode dar maior clareza e confiabilidade aos resultados.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper 56. 1998. Disponível em: <www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em: 02 mai. 2017.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, n.36, p. 351-360, dez. 2010.

BORGES JR. J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L.T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.4, p. 380-390, 2012.

CARBONE, M.; PRINCIPATO, F.; GAROFALO, G.; PIRO, P. Comparison of evapotranspiration computation by FAO-56 and Hargreaves methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 2016.

CHUNG, E.G.; BOMBARDELLI, F.A.; SCHLADOW, S.G. Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake. **Ecological Modelling**, n. 220, p. 1251-1265, mar. 2009.

DIGIOVANNI, K. **Evapotranspiration from urban green spaces in a Northeast United States City**. 2013. 488p. Tese (Doutorado em Filosofia na Engenharia Ambiental) – Universidade de Drexel, Pensilvânia, 2013.

DIGIOVANNI, K.; GAFFIN, S.; MONTALTO, F.; ROSENZWEIG, C. The applicability of classical predictive equations for the estimation of evapotranspiration from urban green spaces: green roofs results. **In: World Environmental and Water Resources Congress**. 2013.

FELLER, M. M. **Quantifying evapotranspiration in green infrastructure: a green roof case study**. 2011. 107p. Tese (Mestrado em Ciência da Engenharia Civil) – Universidade de Villanova, Pensilvânia, 2011.

FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. da.; AMORIM, A. de O. **Evapotranspiração – Uma revisão sobre os métodos empíricos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa arroz e feijão. 2010.

FERREIRA, P. F.; PICCILLI, D. G. A.; CECONI, D. E.; FONTOURA, J. R.; BASSO, R.E. Análise comparativa dos métodos de estimativa dos métodos de estimativa da taxa de evapotranspiração de referência para a região sul do Brasil. **In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília, 2015.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M.M.; MEKONNEN, M. M. **Manual de avaliação da pegada hídrica. Estabelecendo o padrão global**. Editora: Earthscan, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Estações automáticas**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 01 jul. 2016.

IRGA, P. J.; BRAUN, J. T.; DOUGLAS, A. N. J.; PETTIT, T.; FUJIWARA, S.; BURCHETT, M. D.; TORPY, F. R. The distribution of green walls and green roofs throughout Australia: Do policy instruments influence the frequency of projects? **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 24, p. 164-174, mai. 2017.

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S. E.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, v. 43, p. 157-164, 2012.

JESUS, E. dos S. **Avaliação da evapotranspiração na microrregião do Seridó: uma contribuição metodológica**. 2014. 120p. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

LORENZINI NETO, F. **Modelagem de telhado verde: uma análise da eficiência no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas**. 2014. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

MARASCO, D. E. CULLIGAN, P. J.; MCGILLIS, W.R. Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City. **Ecological Engineering**, v. 84, p. 451-462, 2015.

MARTIN, B. K. **The dynamic stormwater response of a green roof**. 2008. 159 p. Dissertação (Mestrado em Paisagem Arquitetônica) – Universidade de Guelph, Canadá, 2008.

MEDEIROS, S. L. P. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 105-109, 1998.

MORAES, J. G. **Balço hídrico e coeficiente de cultura em argissolo vermelho amarelo cultivado com a laranja ‘Folha murcha’ no noroeste fluminense**. 2013. 74p. Dissertação (Mestrado em Produção vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2013.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I- A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970.

PERSCH, C. G. **Avaliação da eficiência de um telhado verde no controle quantitativo do escoamento pluvial**. 2012. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.16, p. 89-102.

REZAEI, F. **Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species**. 2005. 167p. Tese (Mestrado em Ciência) – Universidade do Estado da Pensilvânia, Pensilvânia, 2005.

SCHNEIDER, D. **Quantifying evapotranspiration from a green roof analytically**. 2011. 85p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Villanova, Pensilvânia, 2011.

SCHNEIDER, D.; WADZUK, B. M.; TRAVER, R. Using a weighing lysimeter to determine a crop coefficient for a green roof to predict evapotranspiration with the fao standardized Penman-Monteith equation. **In: World Environmental and Water Resources Congress**. 2011.

SCUDERI, C. M. **Estimativa da taxa de evapotranspiração da macrófita aquática “*Zizaniopsis Bonariensis*”**: aplicação à simulação do nível de água do longo período do Banhado do Taim (RS). 2011. 182p. Mestrado (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SIA, M. E. **Evapotranspiration from extensive green roofs**: influence of climatological conditions, vegetation type, and substrate depth. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Western Ontario, Ontario, 2016.

STARRY, O.; LEA-COX, J.; RISTVEY, A.; COHAN, S. Parameterizing a water-balance model for predicting stormwater runoff from green roofs. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 12, Dez. 2016.

STOVIN, V.; VESUVIANO, G.; KASMIN, H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. **Journal of Hydrology**, p. 148-161, 2012.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D.G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n.1, p.139-154, jan./mar.2014.

VOYDE, E. A. **Quantifying the complete hydrologic budget for an extensive living roof**. 2011. 224p. Tese (Doutorado em Filosofia da Engenharia Civil) - Universidade de Auckland, Nova Zelândia, 2011.

VOYDE, E.; FASSMAN, E.; SIMCOCK, R.; WELLS, J. Quantifying evapotranspiration rates for New Zealand green roofs. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.6, n. 15, p. 395-403, jun. 2010.

WADZUK, B. M.; SCHNEIDER, D.; FELLER, M.; TRAVER, G. R. Evapotranspiration from a green-roof storm-water control measure. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 2013.

ZONTA, J.H.; BEZERRA, J.R.C.; PEREIRA, J.R.; SOFIATTI, V. **Manejo da irrigação do algodoeiro**. EMBRAPA, 2016.

3 CONCLUSÃO GERAL

Com base no monitoramento de módulos experimentais de telhados verdes extensivos, durante um período de oito meses, pôde-se concluir que:

- As taxas de evaporação dos módulos não vegetados são, nos primeiros dias após a ocorrência de um evento chuvoso, superiores à evapotranspiração dos módulos vegetados o que se justifica pela superfície do substrato diretamente exposta à ação das variáveis climatológicas;

- Após alguns dias sem precipitação as taxas de evaporação são reduzidas e a evapotranspiração passa a ser predominante. Isso demonstra que a vegetação tem um papel importante na extração adicional de umidade na camada de substrato, como também mostra sua capacidade de controlar a perda de água e sobreviver por mais tempo, mantendo a funcionalidade dos telhados verdes;

- O maior volume de evapotranspiração ocorreu nos meses com menores volumes e frequência de chuvas, o que mostra que assim como a evapotranspiração depende da disponibilidade de água, ao mesmo tempo volumes de chuva significativos e recorrentes pode inviabilizar o processo de evapotranspiração e reduzir a eficiência dos telhados verdes na retenção de água pluvial. Neste trabalho, os coeficientes de escoamento para módulos vegetados e não vegetados foram bastante próximos, o que indica que ambos tiveram desempenho semelhantes. Salienta-se que o período de monitoramento foi caracterizado por alta umidade relativa do ar e por precipitações recorrentes, o que pode ter interferido no processo de evapotranspiração;

- As taxas de evapotranspiração apresentam variabilidade em função do comportamento das precipitações e, conseqüentemente, da disponibilidade de água na camada de substrato, da ação das variáveis climatológicas e de características relacionadas ao ciclo vegetativo da planta. Por guardar dependência com a sazonalidade, com o clima local e com as especificidades construtivas dos telhados verdes, é necessário que os estudos sejam realizados por períodos de tempo mais longos e em diferentes regiões do Brasil.

- Quanto às equações clássicas de estimativa da evapotranspiração testadas, foi possível verificar que as mesmas apresentaram bons ajustes, na escala diária, quando o valor estimado é corrigido com o coeficiente de cultura (K_c) e de estresse

hídrico (K_s); portanto, é fundamental o conhecimento desses dois fatores já que eles variam de uma espécie para outra e ainda conforme as condições ambientais e fase de desenvolvimento da vegetação. Os modelos com as melhores respostas foram os de Penman, Slatyer-McIlroy e Priestley-Taylor, sendo que essas equações podem ser úteis na estimativa da evapotranspiração em telhados verdes quando da impossibilidade de medições diretas.

4 RECOMENDAÇÕES GERAIS

Com base na metodologia utilizada e nos resultados obtidos com esta pesquisa, recomenda-se:

- Um período de monitoramento mais longo, a fim de verificar tendências sazonais e anuais, com a quantificação do peso dos módulos e das parcelas precipitadas e escoadas realizada de forma automática. Isso permitirá o conhecimento da evapotranspiração com maior precisão e em intervalos de tempo menores e evitará ainda problemas relacionados às falhas de medição;

- Alocação dos módulos experimentais em um telhado verde em escala real, com instalação de estação climatológica *in loco*, como forma de tornar os resultados mais confiáveis;

- Avaliação do comportamento da evapotranspiração em diferentes tipos de substrato e de espécies de plantas, em monoculturas ou composições, como forma de buscar uma melhor concepção construtiva das coberturas vegetadas;

- Desenvolvimento de um modelo específico para a previsão da evapotranspiração em telhados verdes, levando em conta os fatores climatológicos e as condições variáveis de umidade que ocorrem nos substratos de telhados verdes;

- Validação dos resultados obtidos com a utilização das equações clássicas testadas mediante seu emprego para outros períodos de monitoramento mais abrangente que os 8 meses, bem como validar e verificar a possibilidade de extrapolação dos coeficientes de cultura e de estresse hídrico para a cidade de Santa Maria-RS e outras regiões climáticas.

Este trabalho serve como um importante passo em direção à compreensão da evapotranspiração no comportamento hidrológico dos telhados verdes. À medida que mais pesquisas forem desenvolvidas, sobretudo no Brasil, maiores esclarecimentos poderão ser alcançados.

REFERÊNCIAS GERAIS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper 56. 1998. Disponível em: <www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>. Acesso em: 02 mai. 2017.

AMPIM, P. A. Y. et al. Green roof growing substrates: types, ingredients, composition and properties. **Journal of Environmental Horticulture**, 28 (4), p.136-143, dez. 2010.

BALDESSAR, S. M. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. 2012. 125 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2012.

BARBOZA JÚNIOR, C. R. A. **Evapotranspiração e sua medida por lisímetro de pesagem**. 2009. 10p. Disponível em:<http://www.leb.esalq.usp.br/aulas/lce502/texto_Cicero_barboza.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2016.

BENGTSSON, L. Peak flows from thin sedum-moss roof. **Nordic Hydrology**, v. 36 (3), p. 269-280, 2005.

BERGHAGE, R. D., et al. **Quantifying evaporation and transpirational water losses from green roofs and green roof media capacity for neutralizing acid rain**. National Decentralized Water Resources Capacity Development Project. Universidade da Pensilvânia, Pensilvânia, 2007.

BERLATO, M. A., MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Boletim Técnico 7. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Agronômicas (IPAGRO), 95 p., 1981.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. **Ecological Engineering**, v.36, p. 351–360, dez. 2010.

BERRETTA, C.; POË, S.; STOVIN, V. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: the influence of vegetation and substrate characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 511, p. 374-386, abr. 2014.

BIANCHINI, F.; HEWAGE, K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. **Building and Environment**. v. 48, p. 57-65, ago. 2012.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3.ed. Porto Alegre: Editora: Bookman, 2013. 667p.

BUSAIDI, A. A.; YAMAMOTO, T.; TANAK, S.; MORITANI, S. **Evapotranspiration of Succulent Plant (*Sedum aizoon* var. *floibundum*)**. 2013. 18p. Disponível em: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/40958.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

CARBONE, M.; PRINCIPATO, F.; GAROFALO, G.; PIRO, P. Comparison of evapotranspiration computation by FAO-56 and Hargreaves methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 2016.

CARSON, T. B.; MARASCO, D. E.; CULLIGAN, P. J.; MCGILLIS, W. R. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. **Environmental Research Letters**, v.8, n.2, jun. 2013.

CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 161 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

CENTRE FOR ARCHITECTURAL ECOLOGY. **Green roofs**. 2015. Disponível em: <<http://commons.bcit.ca/greenroof/>>. Acesso em: 30 nov. 2015.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013, 336p.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. 2008. 151p.

COMPTON, J. S. **An examination of green roof plant selection and design to optimize for evapotranspiration**. 2006. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade de Cornell. Ithaca, NY, 2006.

CURRIE, B. A.; BASS, B. Using green roofs to enhance biodiversity in city of Toronto: a discussion paper. 2010. Disponível em: <http://www1.toronto.ca/city_of_toronto/city_Plannign/zoning_environment/files/pdf/greenroofs_biodiversity.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

CARVALHO, D. F. de.; SILVA, L. D. B. da. **Ciclo hidrológico**. 2006. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap2-CH.pdr>>. Acesso em: 24 nov. 2015.

DIGIOVANNI, K. **Evapotranspiration from urban green spaces in a northeast United States city**. 2013. 488p. Tese (Doutorado em Filosofia da Engenharia do Meio Ambiente) – Universidade de Drexel, EUA, 2013.

DIGIOVANNI, K.; GAFFIN, S.; MONTALTO, F.; ROSENZWEIG, C. The applicability of classical predictive equations for the estimation of evapotranspiration from urban green spaces: green roofs results. **In: World Environmental and Water Resources Congress**. 2013.

DONALDSON, S. **Low impact development in northern Nevada: green roofs**. 2009. 4p. Disponível em: <<https://www.unce.unr.edu/publications/files/nr/2009/fs0927.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

ECOTELHADO. **Arquitetura sustentável**. 2015. Disponível em: <<http://ecotelhado.com/>>. Acesso em: 30 nov. 2015.

FASSMAN, E. A.; SIMCOCK, R.; VOYDE, E. **Extensive green (living) roofs for stormwater mitigation**. 2010. 197p.

FEIJÓ, J. M. L. **Green roofs news**. 2006. International Green Roof Association. Disponível em: <http://www.igraworld.com/links_and_download/images_dynamic/IGRA_Green_Roof_News_2_06.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2015.

FELLER, M. M. **Quantifying evapotranspiration in green infrastructure: a green roof case study**. 2011. 107p. Tese (Mestrado em Ciência da Engenharia Civil) – Universidade de Villanova, Pensilvânia, 2011.

FELLER, M., TRAVER, R.; WADZUK, B. Estimation of green roof evapotranspiration – experimental results. **Low impact development 2010: redefining water in the city**. 2010.

FELTRIN, R. M. **Comportamento das variáveis hidrológicas do balanço hídrico do solo em lísímetros de drenagem**. 2009. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2009.

FERRAZ, I. L. **O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica**. 2012. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FIORETTI, R., et al. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. **Building and Environment**, 45, 1890–1904, ago. 2010.

GAROTTI, L. M. **Caracterização urbanística e hidrológica do uso e ocupação do solo urbano da cidade de Ribeirão Preto-SP**. 2008. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2008.

GETTER, K. L. ROWE, D. B. **Selecting plants for extensive green roofs in the United States**. 2008. 9p. Disponível em: <http://sbeap.org/files/sbeap/publication/s/greeninfraestructure/GreenRoof_guide_ExtensionBulletin.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2015.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. **Ecological Engineering**, 31, p.225-231, jun. 2007.

GRIFFIN, W. N. **Extensive green roof substrate composition: effects of physical properties on matric potential, hydraulic conductivity, plant growth, and stormwater retention in the Mid-Atlantic**. 2014. 176p. Dissertação (Doutorado em Filosofia) – Universidade de Maryland, 2014.

GUANDIQUE, M. E. G.; MORAIS, L. C. de. **Estudos de variáveis hidrológicas e do balanço hídrico em bacias hidrográficas**. 2015. Disponível em: <http://ecologia.ib.usp.br/reservatorios/PDF/Cap._29_Variaveis_hidrologicas.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2015.

HOOVER, R. C. **An evaluation of an extensive green roof maintenance method.** 2010. 124p. Tese (Mestrado em Horticultura) – Universidade do Estado da Pensilvânia, Pensilvânia, 2010.

INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION-IGRA. **Global networking for green roofs.** 2015. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/>>. Acesso em: 01 dez. 2015.

JOBIM, A. L. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial.** 2013. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

KRISHNAN, R.; AHMAD, H. Influence of low growing vegetation in reducing stormwater runoff on green roofs. **International Journal of High-Rise Buildings**, v.3, n.4, dez., 2014.

LANG, S. B. **Green roofs as an urban stormwater best management practice for water quantity and quality in Florida and Virginia.** 2010. 273 p. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Universidade da Flórida. Flórida, EUA, 2010.

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

LORENZINI NETO, F. **Modelagem de telhado verde:** uma análise da eficiência no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas. 2014. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

LORENZO, M. PEDOLOGIA. **Morfologia:** Retenção de Água no Solo.2010 Disponível em: <http://marianaplorenzo.com/tag/capacidade-de-campo-ponto-de-murcha-e-agua-disponivel/>. Acesso em: 20 dez. 2015.

MAGILL, J. **A History and definition of green roof technology with recommendations for future research.** 2007. 68p. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Universidade do Sul de Illinois, EUA, 2007.

MARASCO, D. E.; HUNTER, B. N.; CULLIGAN, P. J.; GAFFIN, S. R.; MCGILLIS, W. R. Quantifying evapotranspiration from urban green roofs: a comparison of chamber measurements with commonly used predictive methods. **Environmental Science & Technology**. n. 48, p. 10273-10281, 2014.

MARTIN, B. K. **The dynamic stormwater response of a green roof.** 2008. 159 p. Dissertação (Mestrado em Paisagem Arquitetônica) – Universidade de Guelph. Canadá, 2008.

MILLER, A. P. R. R. **Análise do comportamento de substrato para retenção de água pluvial para coberturas verdes extensivas em Curitiba – PR.** 2014. 93p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2014.

MIRANDA, R. A. C. de.; OLIVEIRA, M. V. S. de.; SILVA, D. F. de. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos. **Geo UERJ**, v.1 n. 21, 2010. Disponível em:<<http://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/download/.../1226>>. Acesso em: 24 nov. 2015.

MOTA, J. C. A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolo cultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície**. 2010. 123p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2010.

NAGASE, A.; DUNNETT, N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. **Landscape and Urban Planning**, v.104, p. 356-363, mar. 2012.

OBENDORFER, E. et al., Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. **American Institute of Biological Sciences**, 57 (10), p. 823-833, nov. 2007.

OHNUMA JÚNIOR, A. A. **Medidas não convencionais de reservação d'água e controle da poluição hídrica em lotes domiciliares**. 2008. 331 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

PALLA, A.; GNECCO, I.; LANZA, L. G. Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. **Water**, 2, p. 140-154, abr. 2010.

PAZ, A. R. da. **Hidrologia aplicada**. 2004. 138p. Disponível em:<http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2016.

PERUCHI, F. **Evapotranspiração real a partir de medidas lisimétricas e sob diferentes condições de disponibilidade hídrica**. 2009. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia-Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

PINTO, L. P. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 283 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.

PÖE, S.; STOVIN, V.; BERRETTA, C. Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, 523, p. 356-367, fev. 2015.

RAMESH, S. **Design principles and case study analysis for impact development practices-green roofs, Rainwater harvesting, vegetated swales**. 2011. 100p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004.

REZAEI, F. **Evapotranspiration rates from extensive green roof plant species**. 2005. 167p. Tese (Mestrado em Ciência) – Universidade do Estado da Pensilvânia, Pensilvânia, 2005.

ROMO, D. **Green roofs worldwide**. 2012. Disponível em: http://www.scp-knowledge.eu/sites/default/files/R%C3%B8m%C3%B8%202012%20Green%20roofs%20worldwide_0.pdf. Acesso em: 30 nov. 2015.

SCHNEIDER, D. **Quantifying evapotranspiration from a green roof analytically**. 2011. 85p. Tese (Mestrado em Ciência da Engenharia Civil) – Universidade de Villanova, Pensilvânia, 2011.

SCHNEIDER, D.; WADZUK, B. M.; TRAVER, R. Using a weighing lysimeter to determine a crop coefficient for a green roof to predict evapotranspiration with the fao standardized Penman-Monteith equation. **In: World Environmental and Water Resources Congress**. 2011.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Evapotranspiração: definições e conceitos**. 2009. 47p. Notas de aula.

SILVEIRA, F. L. da. **Umidade relativa: o que é e como se determina?**. 2014. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/cref/?area=questions&id=711>. Acesso em: 24 nov. 2014.

SKABELUND, L. R.; BROKESH, D. **A designer's guide to small-scale retro-fit green roof planning, design, and implementation**. 2013, 27p. Disponível em: <http://faculty.capd.ksu.edu/lskab/Designers-Guide-to-Green-Roof-Implementation-June-2013-KSU.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2015.

SOUZA, A. da S. P. de. **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo de irrigação**. 2011. 84p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S; TUCCI, C. E. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-18, abr./jun., 2012.

SOUZA, V. de A. **Utilização de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da evapotranspiração em uma cultura de arroz irrigado**. 2013. 88p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

SPEAK, A. F.; ROTHWELL, J. J.; LINDLEY, S. J.; SMITHM C. L. Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. **Science of the Total Environment**. V. 461-462, P. 28-38, set, 2013.

STARRY, O. **The comparative effects of three sedum species on green roof stormwater retention**. 2013. 157p. Dissertação (Doutorado em Filosofia) – Universidade de Maryland, Maryland, EUA, 2013.

STOVIN, V. The potential of green roofs to manage urban stormwater. **Water and Environment Journal**. 24, p. 192-199, mai., 2010.

STOVIN, V.; VESUVIANO, G.; KASMIN, H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. **Journal of Hydrology**, p. 148-161, jan. 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D.G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, v. 14, n.1, p.139-154, jan./mar.2014.

TOLDERLUND, L. **Design guidelines and maintenance manual for green roofs in the semi-arid and arid West**. 2010. Disponível em: <<http://www.cityfgolden.net/media/GreenRoofsSemiAridAridWest.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2015.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. In: **Livro Água Doce**. Cap.14. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS – Porto Alegre- RS: 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora UFRGS. ABRH, EDUSP, 2000.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. 302 p. Brasília, 2006.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY-EPA. **Low Impact Development (LID): a literature review**. 41 p. Outubro, 2000. Disponível em: <http://www.lowimpactdevelopment.org/pubs/lid_litreview.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

URBAN DESIGN TOOLS. **Green roof**. 2015. Disponível em: <http://www.lidstormwater.net/greenroofs_home.htm>. Acesso em: 19 nov. 2015.

URBIS LIMITED. **Study on green roof application in Hong Kong**. 2007. 157p. Disponível em: <http://www.archsd.gov.hk/media/11630/green_roof_study_final_Report.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2015.

UVO, C. B. Hydrology Cycle. 2011. Disponível em: <http://www.to.isac.cnr.it/aost/A_old/aosta2011LectureSeminars/bertacchi-uvo1-2.pdf>. Acesso em 24 nov. 2015.

VANWOERT, N. D.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A.; RUGH, C. L.; FERNANDEZ R. T.; XIAO, L. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. **Journal of Environmental Quality**. 34, p. 1036-1044, 2005.

VOYDE, E. A. **Quantifying the complete hydrologic budget for an extensive living roof**. 2011. 224p. Tese (Doutorado em Filosofia da Engenharia Civil) - Universidade de Auckland, Nova Zelândia, 2011.

VOYDE, E.; FASSMAN, E.; SIMCOCK, R.; WELLS, J. Quantifying evapotranspiration rates for New Zealand green roofs. **Journal of Hydrologic Engineering**. 15, p. 395-403, mai. 2010.

WADZUK, B. M.; SCHNEIDER, D.; FELLER, M.; TRAVER, G. R. Evapotranspiration from a green-roof storm-water control measure. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 2013.

WILLES, J. A. **Tecnologias em telhados verdes extensivos: meios de cultura, caracterização hidrológica e sustentabilidade do sistema**. 2014. 70p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

YONEDA, Y. **Vikings built this amazing green roofed Village**. 2014. Disponível em: <<http://inhabitat.com/sod-covered/viking-houses-recreate-history-at-lanse-aux-meadows/>>. Acesso em: 30 nov. 2015.

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

APÊNDICES

APÊNDICE A – Certificados de calibração da balança

Figura A.1- Certificado de calibração da balança realizada em 03/06/2016



Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos

Av. Roraima, 1000; Prédio 10, Sala 402; Bairro Camobi – Santa Maria/RS
 CEP 97105-900. CNPJ: 95.591.764/0001-05 – IE: 109/0235728
 Fone: (55) 3220 8840; e-mail: ladipp@ufsm.br



Certificado de Calibração 20160603 1327

1 Dados do solicitante
 Cliente Nathana K. S. Arboit
 Endereço Avenida Roraima, 1000, prédio 10, sala 435.

2 Dados do instrumento a ser calibrado

Descrição	Balança eletrônica e mecânica		Solicitação de Serviço	20160603 1327
Data entrada	03/06/2016		Faixa de indicação	0,002 – 40kg
Fabricante	ACS series		Faixa de calibração	0,002 – 40kg
Nº Série	-		Resolução	2g
Modelo	-			
Identificação	-			

3 Condições ambientais

Temperatura	9,8°C	Umidade relativa	66%	Pressão atmosférica	1017hPa
-------------	-------	------------------	-----	---------------------	---------

4 Padrões utilizados

Identificação	Descrição	Rastreabilidade	Validade
CPE 002	Blocos padrão classe F1	MA 134_10_14	22/10/2017
TEH 008	Termohigrômetro	36365-2014	04/12/2016
BAR 001	Barômetro	-	-

5 Método de calibração
 A calibração foi realizada conforme o procedimento POP 5.4 010 LADIPP, revisão 01.

6 Incerteza de medição
 A incerteza de medição relatada é declarada como incerteza padrão da medição multiplicada por um fator de abrangência k , que corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% para uma distribuição t -student com ν_{eff} (graus efetivos de liberdade). A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

7 Resultados

Pontos	Calibração ANTES do ajuste		
	VC (kg)	Média (kg)	Erro de indicação médio (kg)
Carga mínima	0,002	0,002	0,000
11,10%	5,000	4,993	-0,007
22,20%	9,000	8,991	-0,009
33,30%	14,000	13,985	-0,015
44,40%	18,000	17,983	-0,017
55,50%	23,000	22,971	-0,029
66,60%	27,000	26,969	-0,031
77,70%	31,000	30,964	-0,036
88,80%	35,000	34,954	-0,046
100,00%	40,000	39,950	-0,050

ANTES do ajuste		
VC (kg)	Média (kg)	Erro de excentricidade médio (kg)
10,000	9,993	-0,007

8 Informações adicionais

10/06/2016
Data da realização

24/06/2016
Data da emissão



 Morgana Pizzolato
 Signatário autorizado

Este certificado limita-se exclusivamente ao item calibrado, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Somente pode ser reproduzido com a autorização prévia deste laboratório. Os resultados são válidos apenas para as condições do item calibrado.

FOR 5.10 002 CT, Revisão 02

Página 1 de 1


Figura A.2- Certificado de calibração da balança realizada em 28/08/2016



LADIPP

Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos

Av. Roraima, 1000; Prédio 10, Sala 402; Bairro Camobi – Santa Maria/RS
 CEP 97105-900. CNPJ: 95.591.764/0001-05 – IE: 109/0235728
 Fone: (55) 3220 8840; e-mail: ladipp@ufsm.br



SGLab
 Sistema de Gestão de Laboratório - CT

Certificado de Calibração 20160822 1515

1 Dados do solicitante
 Cliente Nathana K. S. Arboit
 Endereço Avenida Roraima, 1000, prédio 10, sala 435.

2 Dados do instrumento a ser calibrado

Descrição	Balança eletrônica e mecânica	Solicitação de Serviço	20160822 1515
Data entrada	22/08/2016	Faixa de indicação	0,002 – 40kg
Fabricante	ACS series	Faixa de calibração	0,002 – 40kg
Nº Série	-	Resolução	2g
Modelo	-		
Identificação	-		

3 Condições ambientais

Temperatura	26,3°C	Umidade relativa	75%	Pressão atmosférica	1004hPa
-------------	--------	------------------	-----	---------------------	---------

4 Padrões utilizados

Identificação	Descrição	Rastreabilidade	Validade
CPE 002	Blocos padrão classe F1	MA 134_10_14	22/10/2017
TEH 008	Termohigrômetro	36365-2014	04/12/2016
BAR 001	Barômetro	-	-

5 Método de calibração
 A calibração foi realizada conforme o procedimento POP 5.4 010 LADIPP, revisão 01.


6 Resultados

Pontos	Calibração ANTES do ajuste			ANTES do ajuste		
	VC (kg)	Média (kg)	Erro de indicação médio (kg)	VC (kg)	Média (kg)	Erro de excentricidade médio (kg)
Carga mínima	0,002	0,001	-0,001			
11,10%	5,000	4,997	-0,003	10,000	9,994	-0,006
22,20%	9,000	8,996	-0,004			
33,30%	14,000	13,995	-0,005			
44,40%	18,000	17,995	-0,005			
55,50%	23,000	22,995	-0,005			
66,60%	27,000	26,990	-0,010			
77,70%	31,000	30,979	-0,021			
88,80%	35,000	34,970	-0,030			
100%	40,000	39,972	-0,028			

7 Informações adicionais

26/08/2016
Data da realização

31/08/2016
Data da emissão



Morgana Pizzolato
Signatário autorizado

Este certificado limita-se exclusivamente ao item calibrado, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Somente pode ser reproduzido com a autorização prévia deste laboratório. Os resultados são válidos apenas para as condições do item calibrado.

FOR 5.10 002 CT, Revisão 02 Página 1 de 1

Figura A.3- Certificado de calibração da balança realizada em 15/12/2016

	Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento e Inovação de Produtos e Processos					
	Av. Roraima, 1000; Prédio 10, Sala 402; Bairro Camobi – Santa Maria/RS CEP 97105-900. CNPJ: 95.591.764/0001-05 – IE: 109/0235728 Fone: (55) 3220 8840; e-mail: ladipp@ufsm.br					
Verificação de balança 201612051507						
1 Dados do solicitante						
Cliente	Nathana Arboit					
Endereço	Avenida Roraima, 1000, prédio 10, sala 435.					
2 Dados do instrumento a ser calibrado						
Descrição	Balança eletrônica e mecânica					
Data entrada	05/12/2016	Solicitação de Serviço	201612051507			
Fabricante	ACS Series					
Nº Série	-	Faixa de indicação	0,002 – 45 kg			
Modelo	-	Faixa de calibração	0,002 – 45 kg			
Identificação	-	Resolução	0,002 kg			
3 Condições ambientais						
Temperatura	26,5 °C	Umidade relativa	51%			
		Pressão atmosférica	1014hPA			
4 Padrões utilizados						
Identificação	Descrição	Rastreabilidade	Validade			
CPE 002	Conjunto de pesos Classe F1	MA134_10_14	22/10/2017			
TEH 008	Termohigrômetro	36365-2014	04/06/2017			
BAR 001	Barômetro	***	***			
5 Método de calibração						
A calibração foi realizada conforme o procedimento POP 5.4 010 LADIPP, revisão 02.						
6 Resultados						
	Verificação da balança			Teste de excentricidade		
Pontos	VC (kg)	Média (kg)	Erro de indicação médio (kg)	VC (kg)	Média (kg)	Erro de excentricidade médio (kg)
Carga mínima	0,002	0,000*	-0,002	20,000	19,931	-0,069
11,10%	5,000	4,996	-0,004			
22,20%	9,000	8,995	-0,005			
33,30%	14,000	13,994	-0,006			
44,40%	18,000	17,995	-0,005			
55,50%	23,000	22,993	-0,007			
66,60%	27,000	26,987	-0,013			
77,70%	31,000	30,981	-0,019			
88,80%	35,000	34,975	-0,025			
100%	40,000	39,965	-0,035			
8 Informações adicionais						
* Durante a aplicação da carga mínima (0,002kg), a balança não reconheceu carga alguma, justificando assim os "zeros" na primeira carga de todas as leituras realizadas.						
15/12/2016	21/12/2016	 Eng. Mônica Pizzolato, Dr. Signatário autorizado				
Data da realização	Data da emissão					
Este certificado limita-se exclusivamente ao item calibrado, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Somente pode ser reproduzido com a autorização prévia deste laboratório. Os resultados são válidos apenas para as condições do item calibrado.						
FOR 5.10.002 CT, Revisão 02						Página 1 de 1

APÊNDICE B – Peso dos módulos na capacidade de vaso

Tabela B.1- Peso dos módulos vegetados (MV) e não vegetados (MNV) na capacidade de vaso.

MÓDULO	PESO (Kg)
MV1	22,820
MV2	21,488
MV3	21,054
MV4	21,258
MV5	23,108
MV6	25,961
MNV1	21,183
MNV2	20,530
MNV3	21,080
MNV4	20,526
MÉDIA	21,901

APÊNDICE C – Equações de cálculo do déficit de vapor do ar

Quadro C.1- Equações de cálculo do déficit de pressão de vapor (Δe).

Déficit de pressão de vapor (kPa)	$\Delta e = e_s - e_a$
Pressão de vapor de saturação média (kPa)	$e_s = \frac{e^0(T_{m\acute{a}x}) + e^0(T_{m\acute{i}n})}{2}$
Pressão de vapor de saturação na temperatura máxima (kPa)	$e^0(T_{m\acute{a}x}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_{m\acute{a}x}}{T_{m\acute{a}x} + 237,3} \right]$
Pressão de vapor de saturação na temperatura mínima (kPa)	$e^0(T_{m\acute{i}n}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_{m\acute{i}n}}{T_{m\acute{i}n} + 237,3} \right]$
Pressão atual de vapor (kPa)	$e_a = \frac{e^0(T_{m\acute{i}n}) \frac{UR_{m\acute{a}x}}{100} + e^0(T_{m\acute{a}x}) \frac{UR_{m\acute{i}n}}{100}}{2}$

APÊNDICE D – Correlação de Spearman entre ET_{c-adj} e as variáveis climatológicas para cada mês, estações do ano e todo o período de monitoramento.

Tabela D.1- Correlação de Spearman para todo período de monitoramento.

	ET_{c-adj} (mm d ⁻¹)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	$T_{méd}$ (°C)	$UR_{máx}$ (%)	$UR_{mín}$ (%)	$UR_{méd}$ d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ET_{c-adj}	1,0									
$T_{máx}$	0,4	1,0								
$T_{mín}$	0,4	1,0	1,0							
$T_{méd}$	0,4	1,0	1,0	1,0						
$UR_{máx}$	0,0	0,1	0,1	0,1	1,0					
$UR_{mín}$	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0				
$UR_{méd}$	0,0	0,0	0,1	0,0	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,1	0,1	0,1	0,1	-0,4	-0,3	-0,3	1,0		
Rad	0,2	0,3	0,3	0,3	-0,4	-0,5	-0,5	0,1	1,0	
Δe	0,2	0,5	0,5	0,5	-0,8	-0,8	-0,8	0,4	0,6	1,0

Tabela D.2 - Correlação de Spearman para o inverno.

	ET_{c-adj} (mm d ⁻¹)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	$T_{méd}$ (°C)	$UR_{máx}$ (%)	$UR_{mín}$ (%)	$UR_{méd}$ d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ET_{c-adj}	1,0									
$T_{máx}$	0,6*	1,0								
$T_{mín}$	0,6*	1,0	1,0							
$T_{méd}$	0,6*	1,0	1,0	1,0						
$UR_{máx}$	-0,6*	-0,3	-0,3	-0,3	1,0					
$UR_{mín}$	-0,6*	-0,3	-0,3	-0,3	1,0	1,0				
$UR_{méd}$	-0,6*	-0,3	-0,3	-0,3	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,0	0,1	0,2	0,1	-0,4	-0,3	-0,3	1,0		
Rad	0,5*	0,2	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4	1,0	
Δe	0,7*	0,7	0,7	0,7	-0,9	-0,9	-0,9	0,3	0,2	1,0

*Significativo a 5%

Tabela D.3 - Correlação de Spearman para a primavera.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,2	1,0								
Tmín	0,2	1,0	1,0							
Tméd	0,2	1,0	1,0	1,0						
URmáx	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0					
URmín	0,0	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0				
URmé	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,1	-0,2	1,0		
Rad	0,3	0,0	0,0	0,0	-0,6	-0,6	-0,6	0,1	1,0	
Δe	0,0	0,6	0,6	0,6	-0,7	-0,7	-0,7	0,1	0,5	1,0

Tabela D.4 - Correlação de Spearman para o verão.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,2	1,0								
Tmín	0,1	1,0	1,0							
Tméd	0,2	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,2	0,2	0,3	0,2	1,0					
URmín	-0,2	0,1	0,2	0,2	0,9	1,0				
URmé	-0,2	0,2	0,3	0,2	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2	-0,3	1,0		
Rad	0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,7	-0,6	-0,7	0,2	1,0	
Δe	0,3	0,2	0,1	0,2	-0,9	-0,9	-0,9	0,3	0,5	1,0

Tabela D.5 - Correlação de Spearman para o mês de Julho.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,4	1,0								
Tmín	0,4	1,0	1,0							
Tméd	0,4	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,9*	-0,5	-0,5	-0,5	1,0					
URmín	-0,9*	-0,5	-0,5	-0,5	1,0	1,0				
URmé	-0,9*	-0,5	-0,5	-0,5	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,7*	0,2	0,3	0,2	-0,6	-0,6	-0,6	1,0		
Rad	0,0	-0,6	-0,6	-0,6	0,1	0,1	0,1	-0,3	1,0	
Δe	0,9*	0,7	0,7	0,7	-1,0	-1,0	-1,0	0,5	-0,2	1,0

*Significativo a 5%

Tabela D.6 - Correlação de Spearman para o mês de Agosto.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,3	1,0								
Tmín	0,2	1,0	1,0							
Tméd	0,3	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,6*	-0,1	-0,1	-0,1	1,0					
URmín	-0,6*	-0,1	0,0	0,0	1,0	1,0				
URmé	-0,6*	-0,1	0,0	-0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	1,0		
Rad	0,7*	0,0	-0,1	0,0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1,0	
Δe	0,7*	0,7	0,6	0,7	-0,8	-0,7	-0,8	-0,1	0,4	1,0

*Significativo a 5%

Tabela D.7- Correlação de Spearman para o mês de Setembro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,3	1,0								
Tmín	0,2	1,0	1,0							
Tméd	0,3	1,0	1,0	1,0						
URmáx	0,4	-0,1	-0,1	-0,1	1,0					
URmín	0,4	-0,1	-0,2	-0,2	1,0	1,0				
URméd	0,4	-0,1	-0,1	-0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,2	-0,1	0,0	0,0	-0,7	-0,7	-0,7	1,0		
Rad	-0,4	-0,1	-0,2	-0,1	0,1	0,0	0,1	-0,4	1,0	
Δe	-0,2	0,5	0,6	0,5	-0,9	-0,9	-0,9	0,6	-0,2	1,0

Tabela D.8 - Correlação de Spearman para o mês de Outubro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,2	1,0								
Tmín	0,2	1,0	1,0							
Tméd	0,2	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,5	0,1	0,1	0,1	1,0					
URmín	-0,5	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0				
URméd	-0,5	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,4	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	1,0		
Rad	0,8*	-0,1	-0,2	-0,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,3	1,0	
Δe	0,5	0,3	0,4	0,4	-0,8	-0,8	-0,8	0,2	0,2	1,0

*Significativo a 5%

Tabela D.9 - Correlação de Spearman para o mês de Novembro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	-0,3	1,0								
Tmín	-0,3	1,0	1,0							
Tméd	-0,3	1,0	1,0	1,0						
URmáx	0,3	0,2	0,2	0,2	1,0					
URmín	0,2	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0				
URmé	0,3	0,2	0,2	0,2	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,1	0,4	0,5	0,4	-0,1	0,1	0,0	1,0		
Rad	0,0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,7	-0,7	-0,7	0,0	1,0	
Δe	-0,4	0,6	0,6	0,6	-0,6	-0,5	-0,6	0,4	0,2	1,0

Tabela D.10 - Correlação de Spearman para o mês de Dezembro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,2	1,0								
Tmín	0,2	1,0	1,0							
Tméd	0,2	1,0	1,0	1,0						
URmáx	0,6	0,3	0,3	0,3	1,0					
URmín	0,6	0,2	0,3	0,3	1,0	1,0				
URmé	0,6	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,3	-0,7	-0,7	-0,7	-0,5	-0,4	-0,5	1,0		
Rad	-0,3	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	0,4	1,0	
Δe	-0,5	0,1	0,1	0,1	-0,8	-0,9	-0,8	0,1	0,1	1,0

Tabela D.11 - Correlação de Spearman para o mês de Janeiro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	-0,1	1,0								
Tmín	-0,1	1,0	1,0							
Tméd	-0,1	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,5*	0,3	0,4	0,3	1,0					
URmín	-0,5*	0,3	0,4	0,3	0,9	1,0				
URmé	-0,5*	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	1,0		
Rad	0,6*	-0,4	-0,5	-0,4	-0,7	-0,7	-0,8	0,1	1,0	
Δe	0,4	0,1	0,0	0,1	-0,8	-0,8	-0,8	0,1	0,5	1,0

*Significativo a 5%

Tabela D.12 - Correlação de Spearman para o mês de Fevereiro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,3	1,0								
Tmín	0,3	1,0	1,0							
Tméd	0,3	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,1	0,1	0,2	0,1	1,0					
URmín	-0,2	0,1	0,2	0,1	1,0	1,0				
URmé	-0,1	0,1	0,2	0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,5	-0,5	-0,4	1,0		
Rad	0,0	-0,2	-0,1	-0,1	-0,6	-0,5	-0,5	0,3	1,0	
Δe	0,4	0,3	0,2	0,2	-0,8	-0,8	-0,9	0,4	0,3	1,0

APÊNDICE E – Correlação de Spearman entre ET_c e as variáveis climatológicas para cada mês, estações do ano e todo o período de monitoramento.

Tabela E.1 - Correlação de Spearman para todo o período de monitoramento.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,2	1,0								
Tmín	0,2	1,0	1,0							
Tméd	0,2	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,1	0,1	0,1	0,1	1,0					
URmín	-0,1	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0				
URmé	-0,1	0,0	0,1	0,0	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,2	0,1	0,1	0,1	-0,4	-0,3	-0,3	1,0		
Rad	0,2	0,3	0,3	0,3	-0,4	-0,5	-0,5	0,1	1,0	
Δe	0,2	0,5	0,5	0,5	-0,8	-0,8	-0,8	0,4	0,6	1,0

Tabela E.2 - Correlação de Spearman para o inverno.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,5	1,0								
Tmín	0,5	1,0	1,0							
Tméd	0,5	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	1,0					
URmín	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	1,0	1,0				
URmé	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,1	0,1	0,2	0,1	-0,4	-0,3	-0,3	1,0		
Rad	0,5	0,2	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4	1,0	
Δe	0,6	0,7	0,7	0,7	-0,9	-0,9	-0,9	0,3	0,2	1,0

*Significativo a 5%

Tabela E.3 - Correlação de Spearman para a primavera.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,0	1,0								
Tmín	-0,1	1,0	1,0							
Tméd	-0,1	1,0	1,0	1,0						
URmáx	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0					
URmín	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0				
URmé	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,1	-0,2	1,0		
Rad	-0,1	0,0	0,0	0,0	-0,6	-0,6	-0,6	0,1	1,0	
Δe	-0,2	0,6	0,6	0,6	-0,7	-0,7	-0,7	0,1	0,5	1,0

Tabela E.4 - Correlação de Spearman para o verão.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,0	1,0								
Tmín	0,0	1,0	1,0							
Tméd	0,0	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,2	0,2	0,3	0,2	1,0					
URmín	-0,2	0,1	0,2	0,2	0,9	1,0				
URmé	-0,2	0,2	0,3	0,2	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,2	-0,3	1,0		
Rad	0,2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,7	-0,6	-0,7	0,2	1,0	
Δe	0,2	0,2	0,1	0,2	-0,9	-0,9	-0,9	0,3	0,5	1,0

Tabela E.5 - Correlação de Spearman para o mês de Julho.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,0	1,0								
Tmín	0,1	1,0	1,0							
Tméd	0,0	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1,0					
URmín	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1,0	1,0				
URméd	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,6	0,2	0,3	0,2	-0,6	-0,6	-0,6	1,0		
Rad	0,2	-0,6	-0,6	-0,6	0,1	0,1	0,1	-0,3	1,0	
Δe	0,5	0,7	0,7	0,7	-1,0	-1,0	-1,0	0,5	-0,2	1,0

Tabela E.6 - Correlação de Spearman para o mês de Agosto.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,5	1,0								
Tmín	0,4	1,0	1,0							
Tméd	0,5	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,6*	-0,1	-0,1	-0,1	1,0					
URmín	-0,6*	-0,1	0,0	0,0	1,0	1,0				
URméd	-0,6*	-0,1	0,0	-0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	1,0		
Rad	0,6*	0,0	-0,1	0,0	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	1,0	
Δe	0,8*	0,7	0,6	0,7	-0,8	-0,7	-0,8	-0,1	0,4	1,0

*Significativo a 5%

Tabela E.7 - Correlação de Spearman para o mês de Setembro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,5*	1,0								
Tmín	0,5*	1,0	1,0							
Tméd	0,5*	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	1,0					
URmín	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	1,0	1,0				
URmé	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,3	-0,1	0,0	0,0	-0,7	-0,7	-0,7	1,0		
Rad	0,3	-0,1	-0,2	-0,1	0,1	0,0	0,1	-0,4	1,0	
Δe	0,3	0,5	0,6	0,5	-0,9	-0,9	-0,9	0,6	-0,2	1,0

*Significativo a 5%

Tabela E.8 - Correlação de Spearman para o mês de Outubro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,2	1,0								
Tmín	0,1	1,0	1,0							
Tméd	0,1	1,0	1,0	1,0						
URmáx	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0					
URmín	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0				
URmé	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	1,0		
Rad	0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,3	1,0	
Δe	0,1	0,3	0,4	0,4	-0,8	-0,8	-0,8	0,2	0,2	1,0

Tabela E.9 - Correlação de Spearman para o mês de Novembro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,0	1,0								
Tmín	0,0	1,0	1,0							
Tméd	0,0	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,3	0,2	0,2	0,2	1,0					
URmín	-0,4	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0				
URméd	-0,4	0,2	0,2	0,2	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,1	0,4	0,5	0,4	-0,1	0,1	0,0	1,0		
Rad	0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,7	-0,7	-0,7	0,0	1,0	
Δe	0,2	0,6	0,6	0,6	-0,6	-0,5	-0,6	0,4	0,2	1,0

Tabela E.10 - Correlação de Spearman para o mês de Dezembro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,4	1,0								
Tmín	0,4	1,0	1,0							
Tméd	0,4	1,0	1,0	1,0						
URmáx	0,7	0,3	0,3	0,3	1,0					
URmín	0,6	0,2	0,3	0,3	1,0	1,0				
URméd	0,7	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0			
Vento	-0,5	-0,7	-0,7	-0,7	-0,5	-0,4	-0,5	1,0		
Rad	-0,3	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	0,4	1,0	
Δe	-0,6	0,1	0,1	0,1	-0,8	-0,9	-0,8	0,1	0,1	1,0

Tabela E.11 - Correlação de Spearman para o mês de Janeiro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	-0,5	1,0								
Tmín	-0,5	1,0	1,0							
Tméd	-0,4	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,6*	0,3	0,4	0,3	1,0					
URmín	-0,5*	0,3	0,4	0,3	0,9	1,0				
URmé	-0,6*	0,3	0,3	0,3	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,0	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,1	0,0	1,0		
Rad	0,8*	-0,4	-0,5	-0,4	-0,7	-0,7	-0,8	0,1	1,0	
Δe	0,3	0,1	0,0	0,1	-0,8	-0,8	-0,8	0,1	0,5	1,0

*Significativo a 5%

Tabela E.12 - Correlação de Spearman para o mês de Fevereiro.

	ETc-adj (mm d ⁻¹)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Tméd (°C)	URmáx (%)	URmín (%)	URmé d (%)	Vento (m s ⁻¹)	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Δe (kPa)
ETc-adj	1,0									
Tmáx	0,2	1,0								
Tmín	0,2	1,0	1,0							
Tméd	0,2	1,0	1,0	1,0						
URmáx	-0,1	0,1	0,2	0,1	1,0					
URmín	-0,3	0,1	0,2	0,1	1,0	1,0				
URmé	-0,2	0,1	0,2	0,1	1,0	1,0	1,0			
Vento	0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,5	-0,5	-0,4	1,0		
Rad	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,6	-0,5	-0,5	0,3	1,0	
Δe	0,4	0,3	0,2	0,2	-0,8	-0,8	-0,9	0,4	0,3	1,0

APÊNDICE F – Comparação entre a ET_c e equações empíricas.

Figura F.1 - Julho/2016.

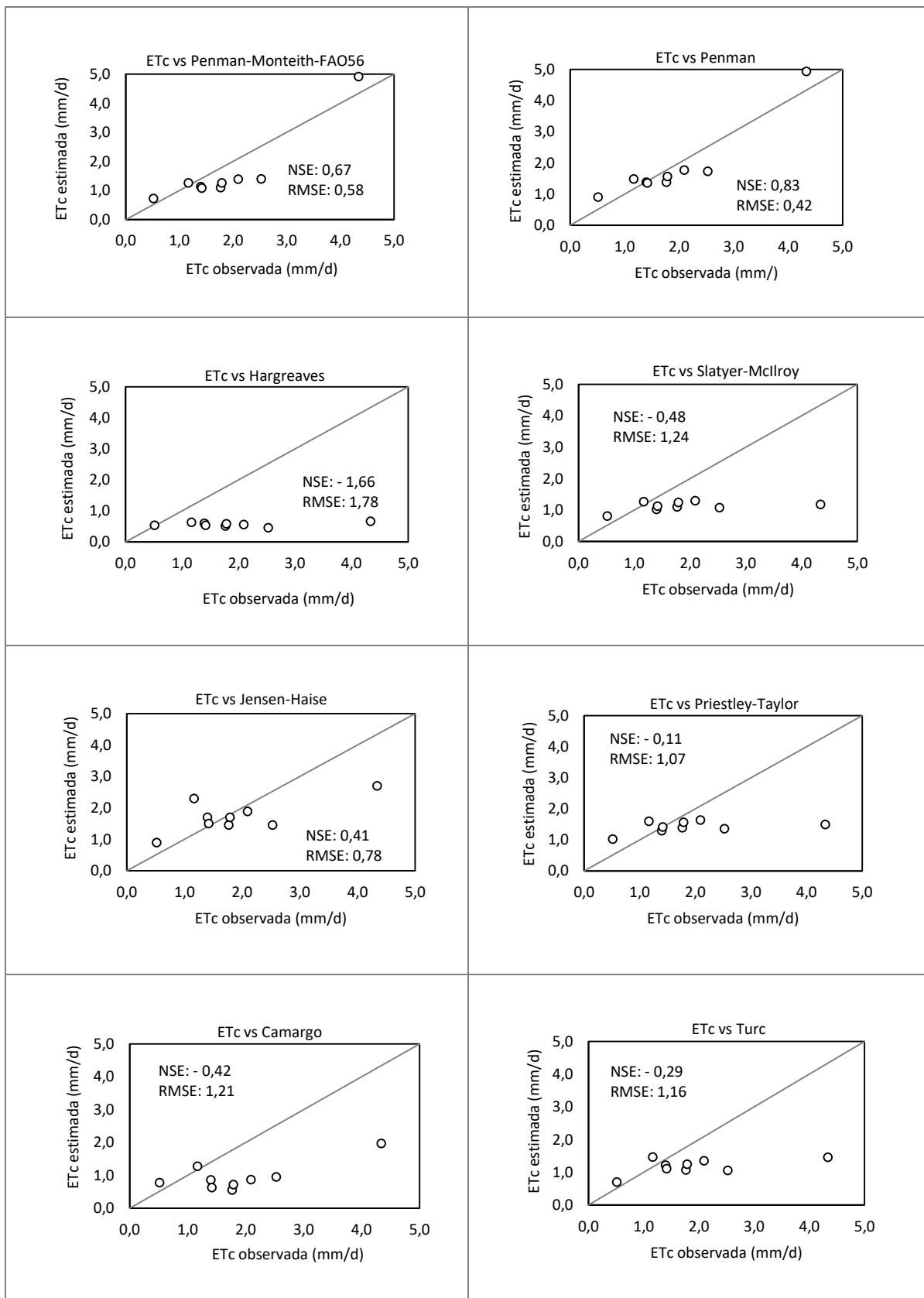


Figura F.2 - Agosto/2016.

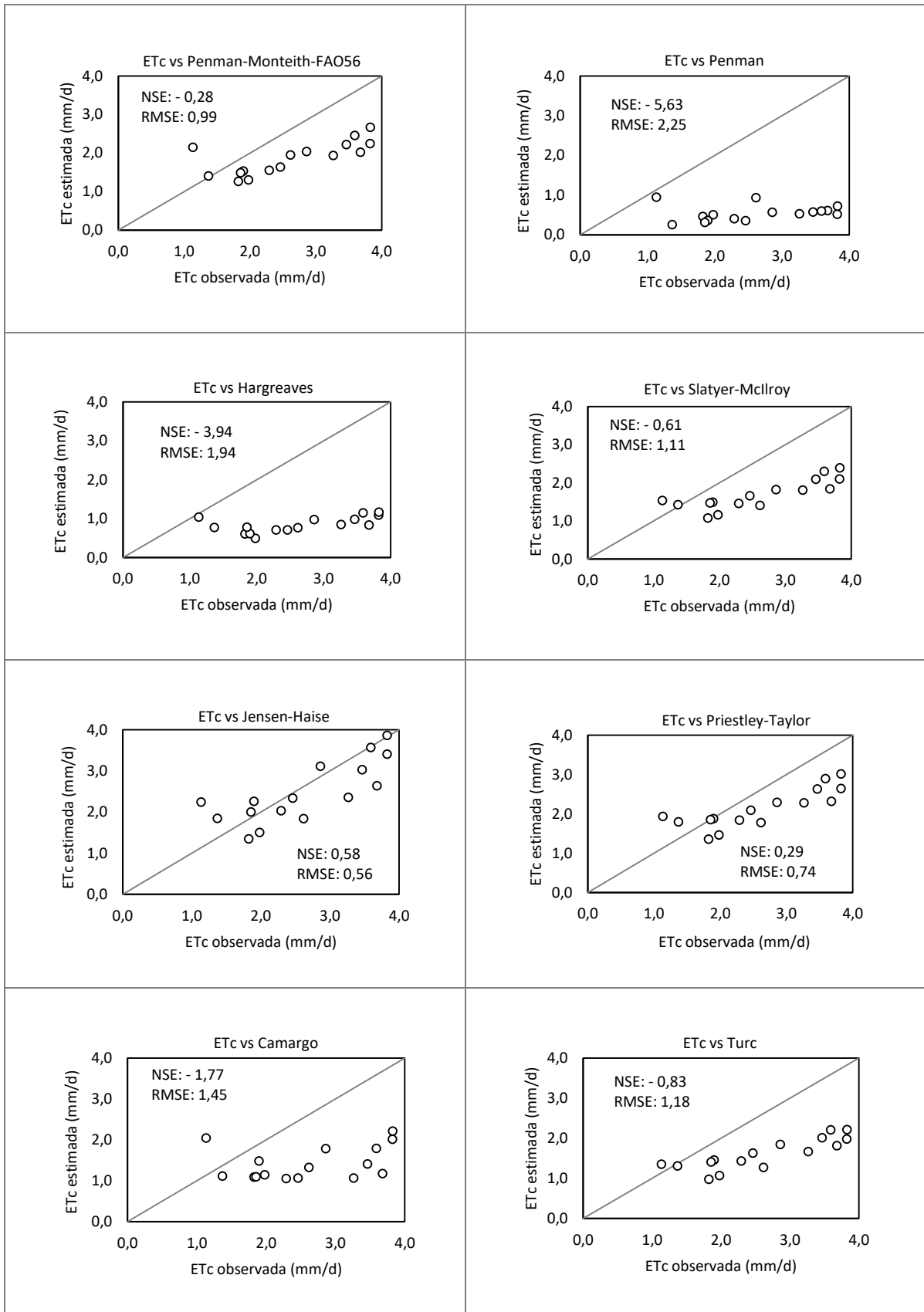


Figura F.3 - Setembro/2016.

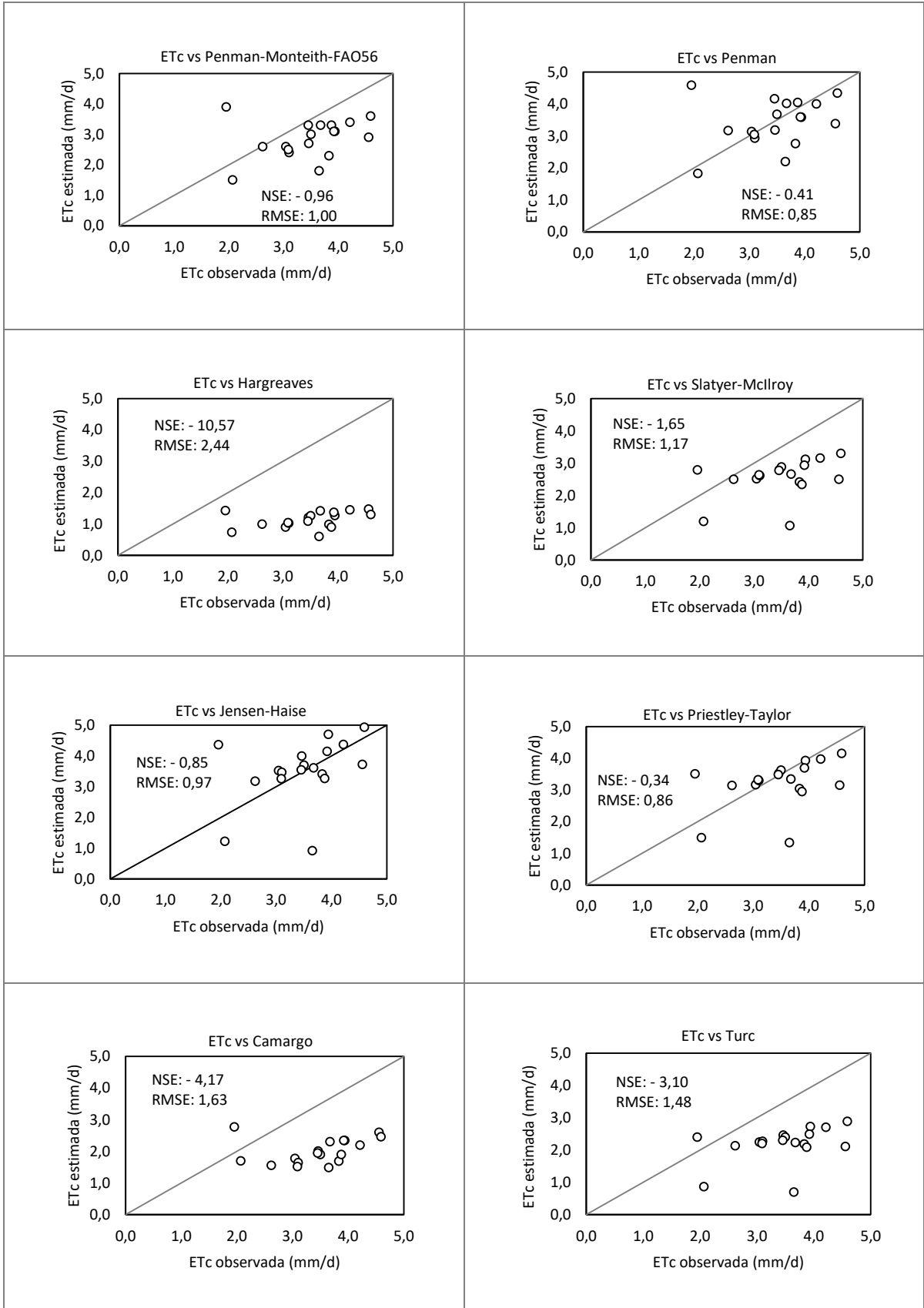


Figura F.4 - Outubro/2016.

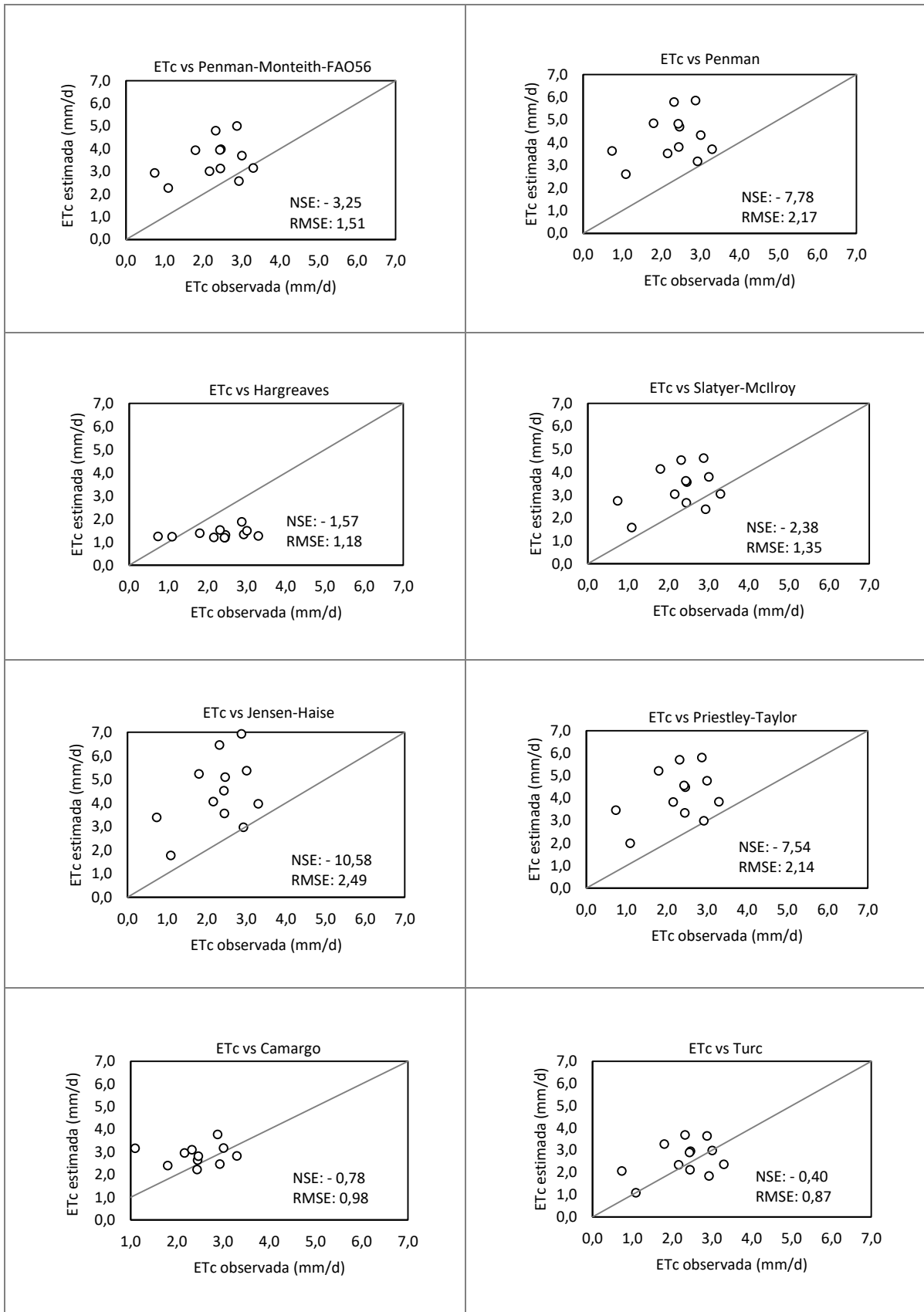


Figura F.5 - Novembro/2016.

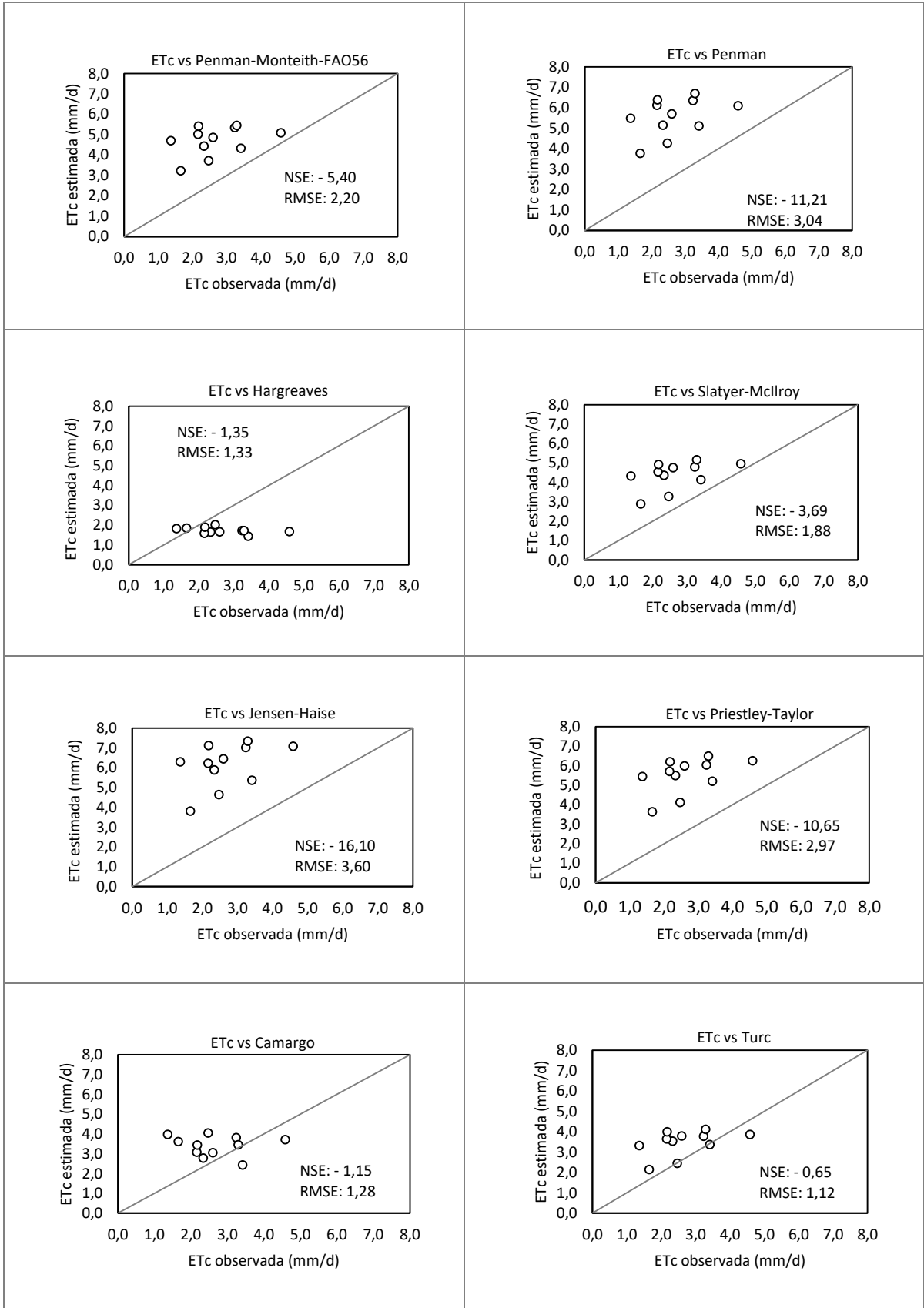


Figura F.6 - Dezembro/2016.

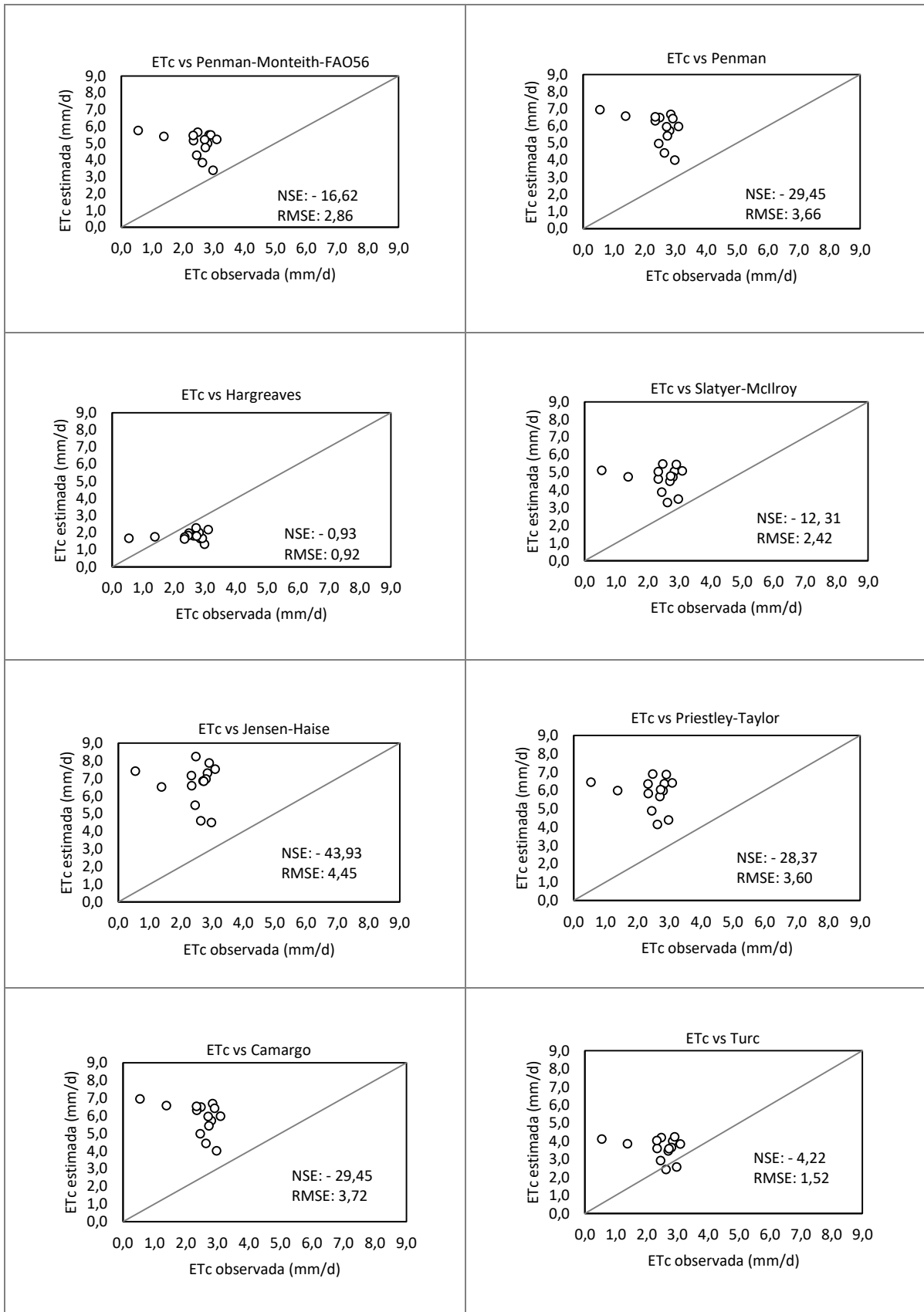


Figura F.7- Janeiro/2017.

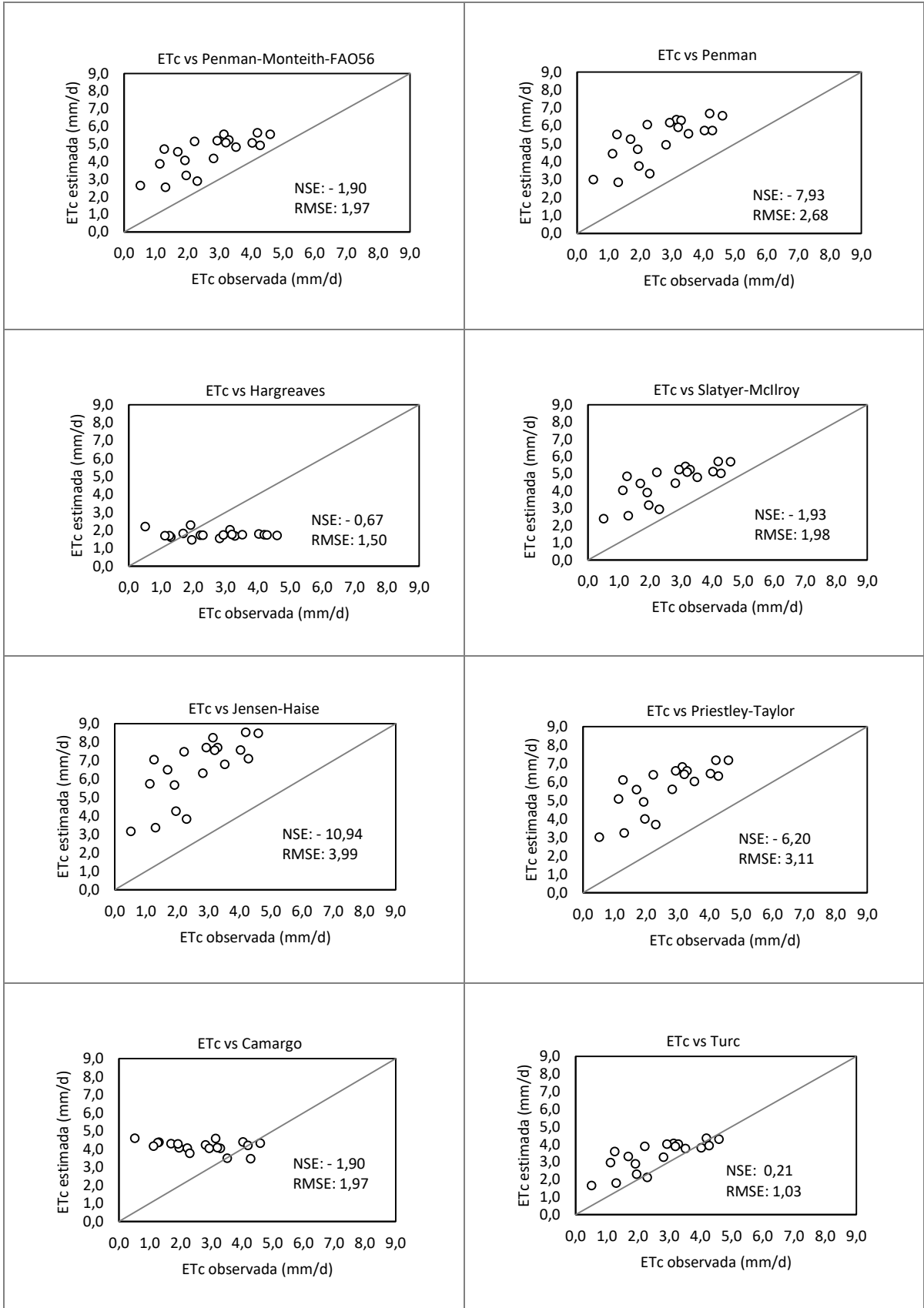


Figura F.8 - Fevereiro/2017.

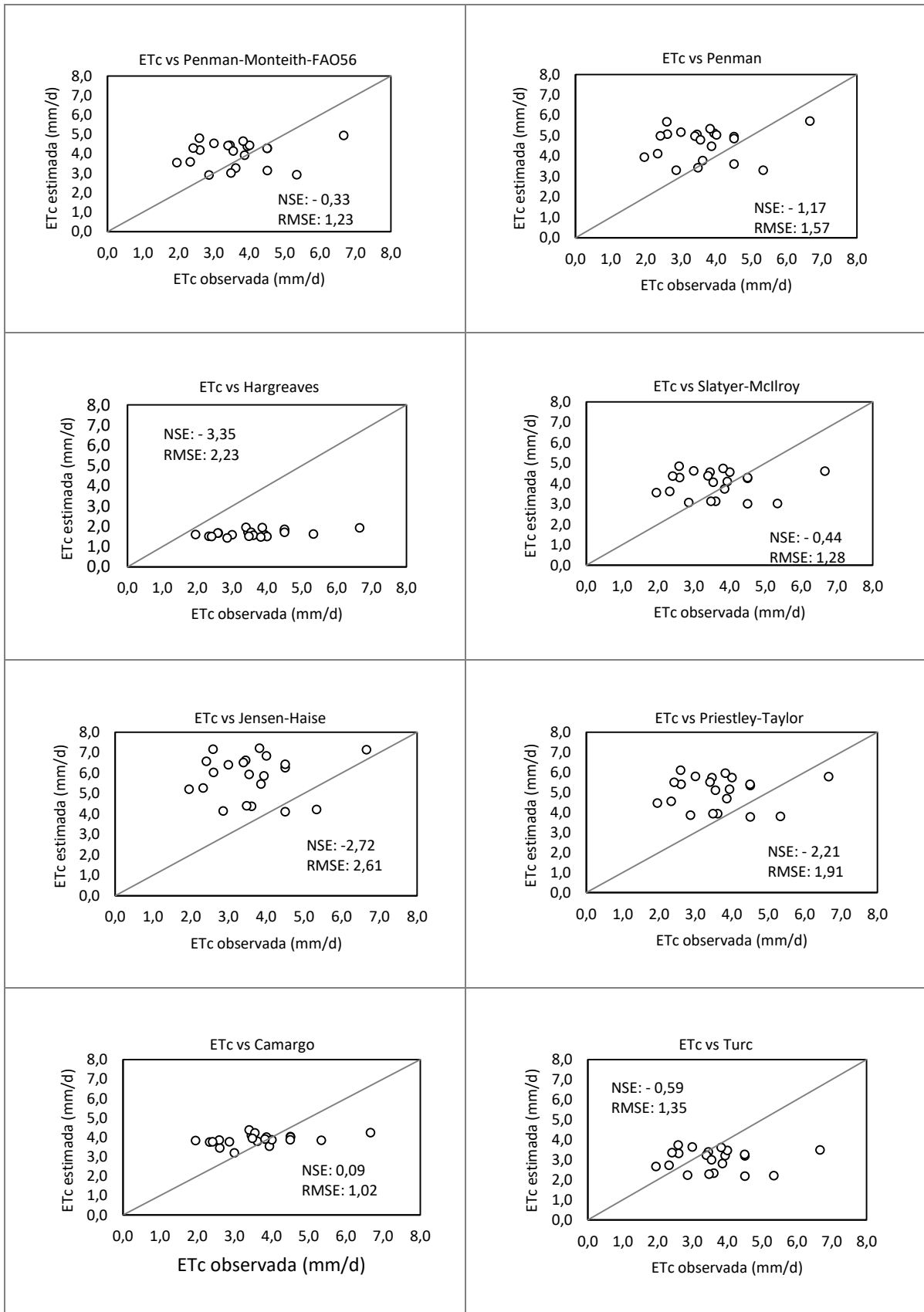


Figura F.9 – Inverno.

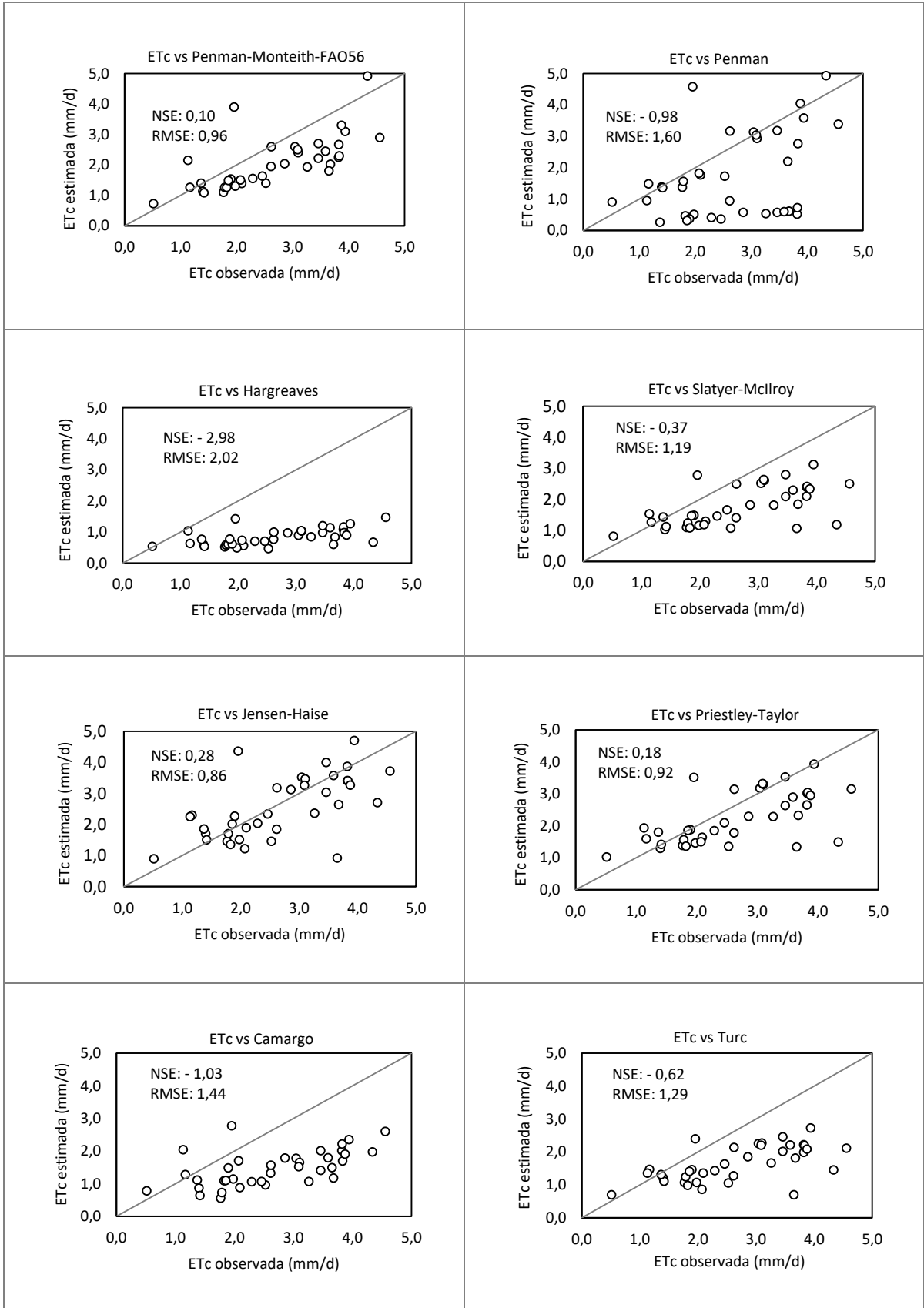


Figura F.10 – Primavera.

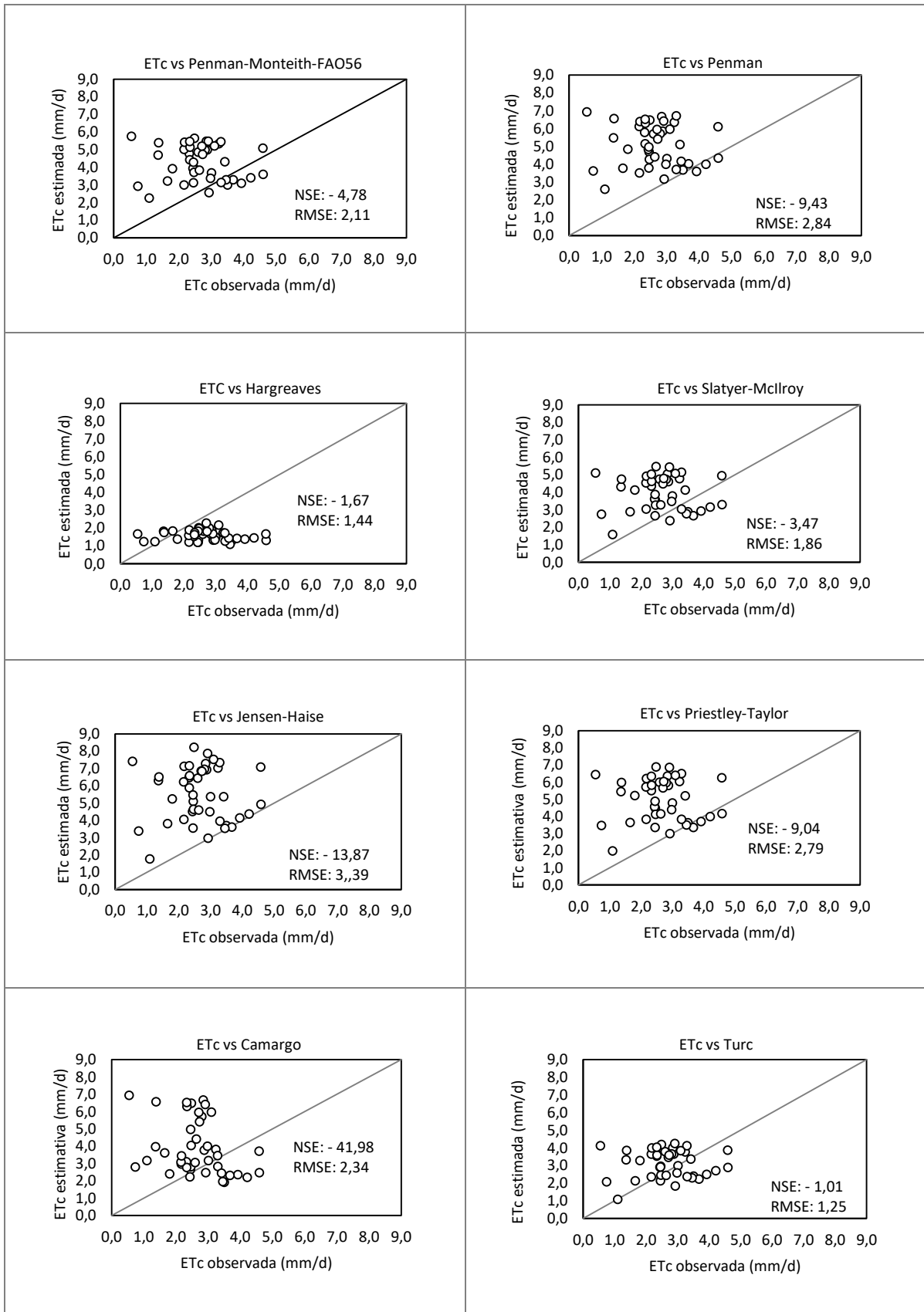


Figura F.11 – Verão.

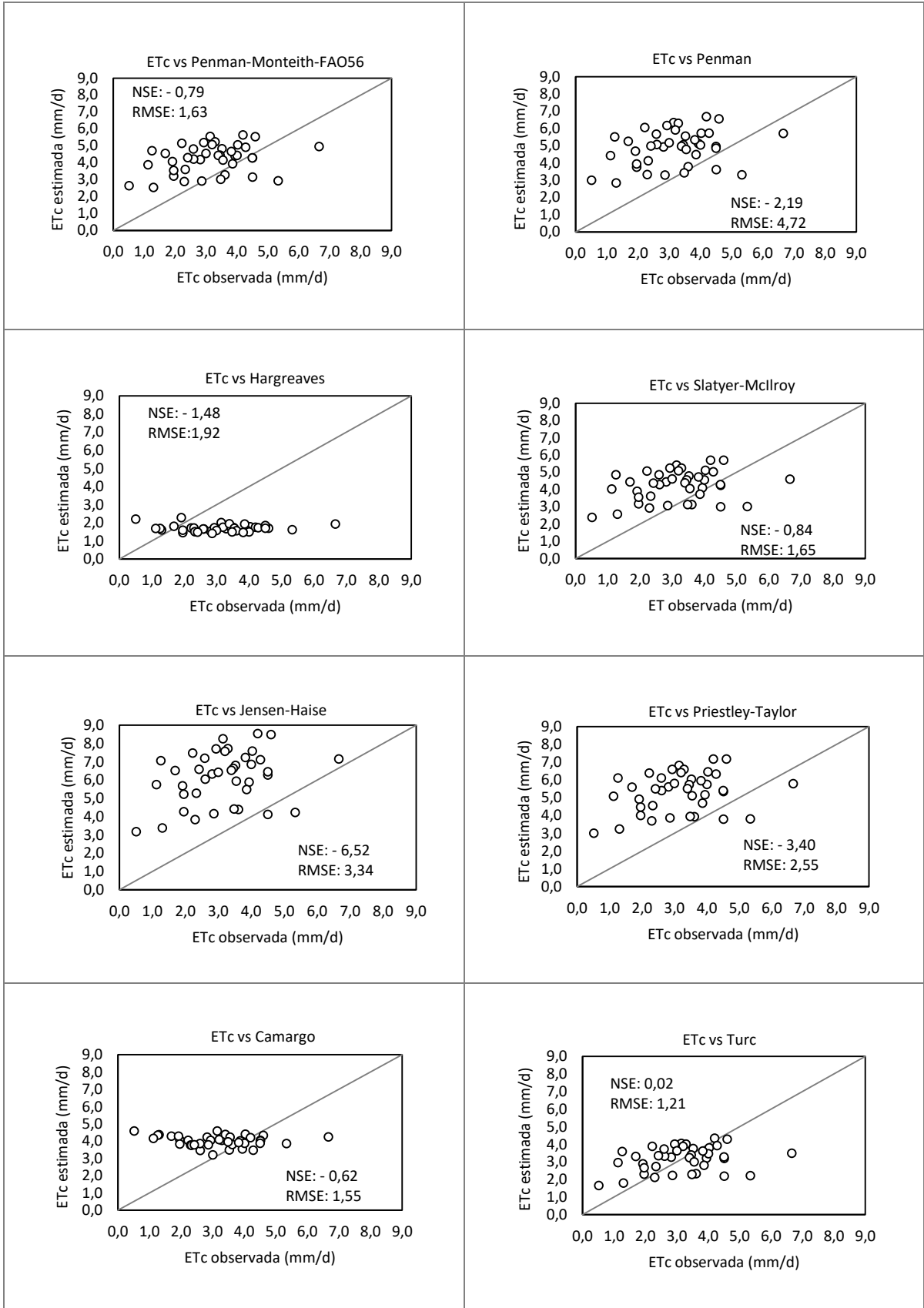
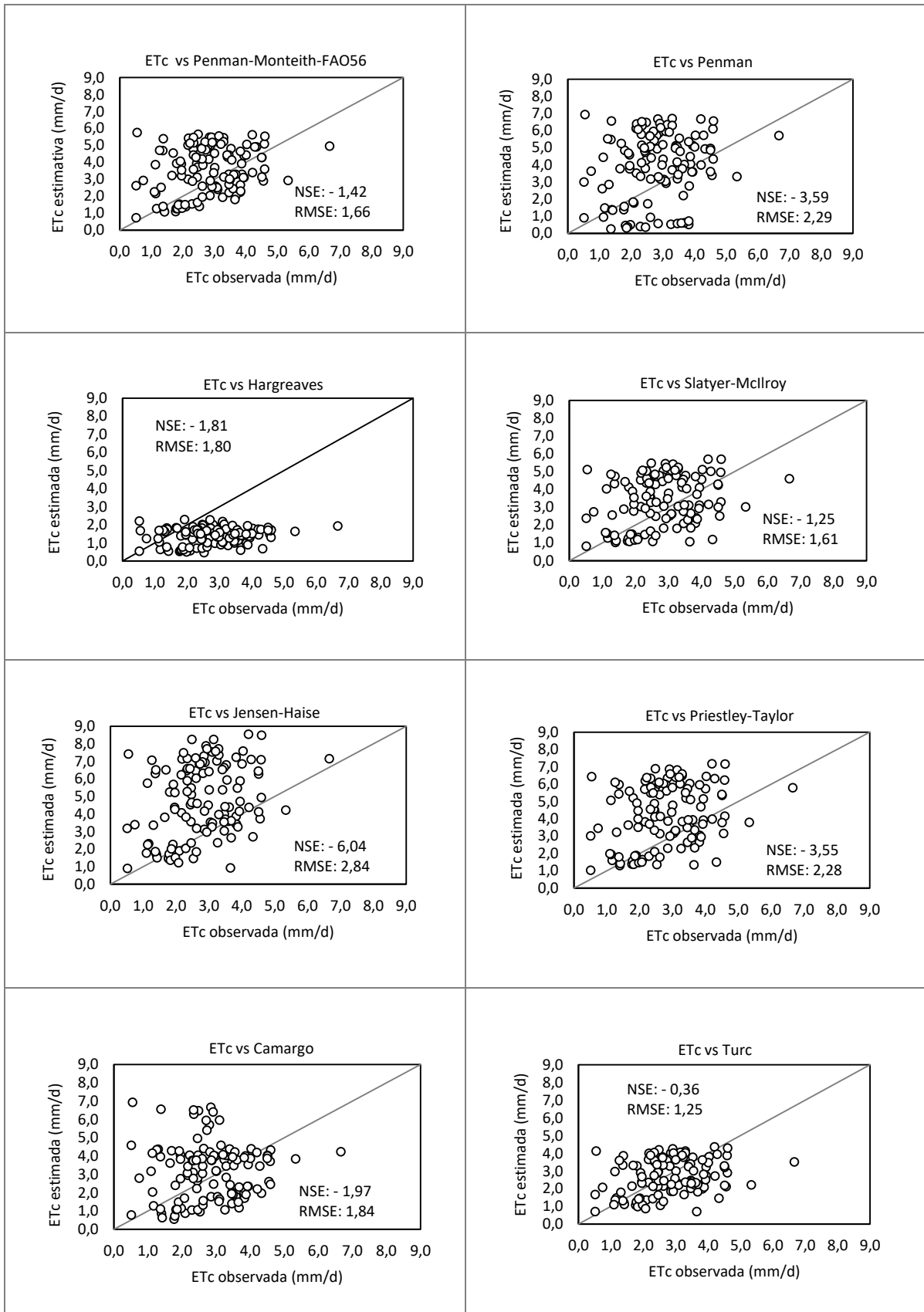


Figura F.12 - Todo período.



APÊNDICE G – Comparação entre ET_{c-adj} e equações empíricas.

Figura G.1 – Julho.

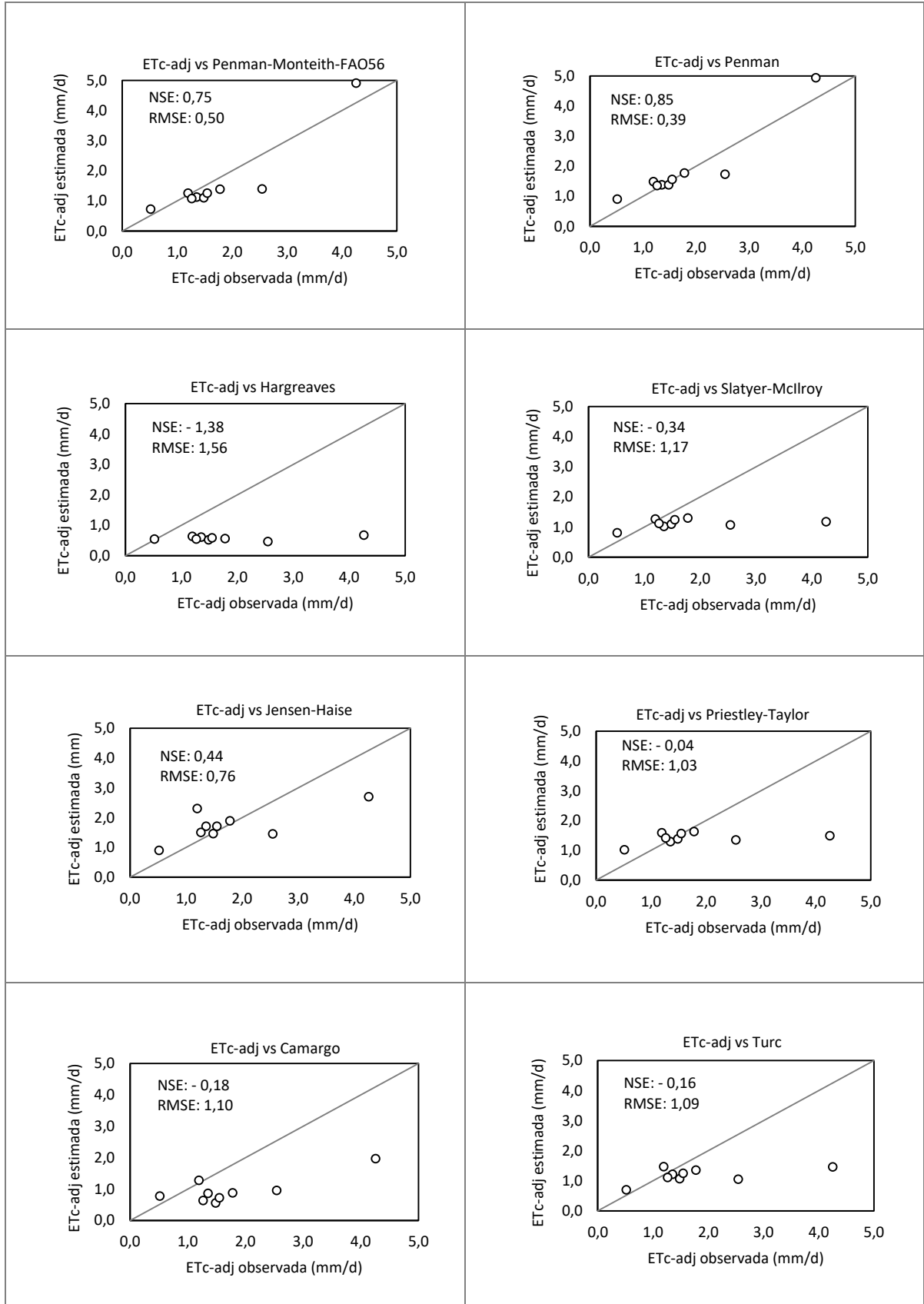


Figura G.2 – Agosto.

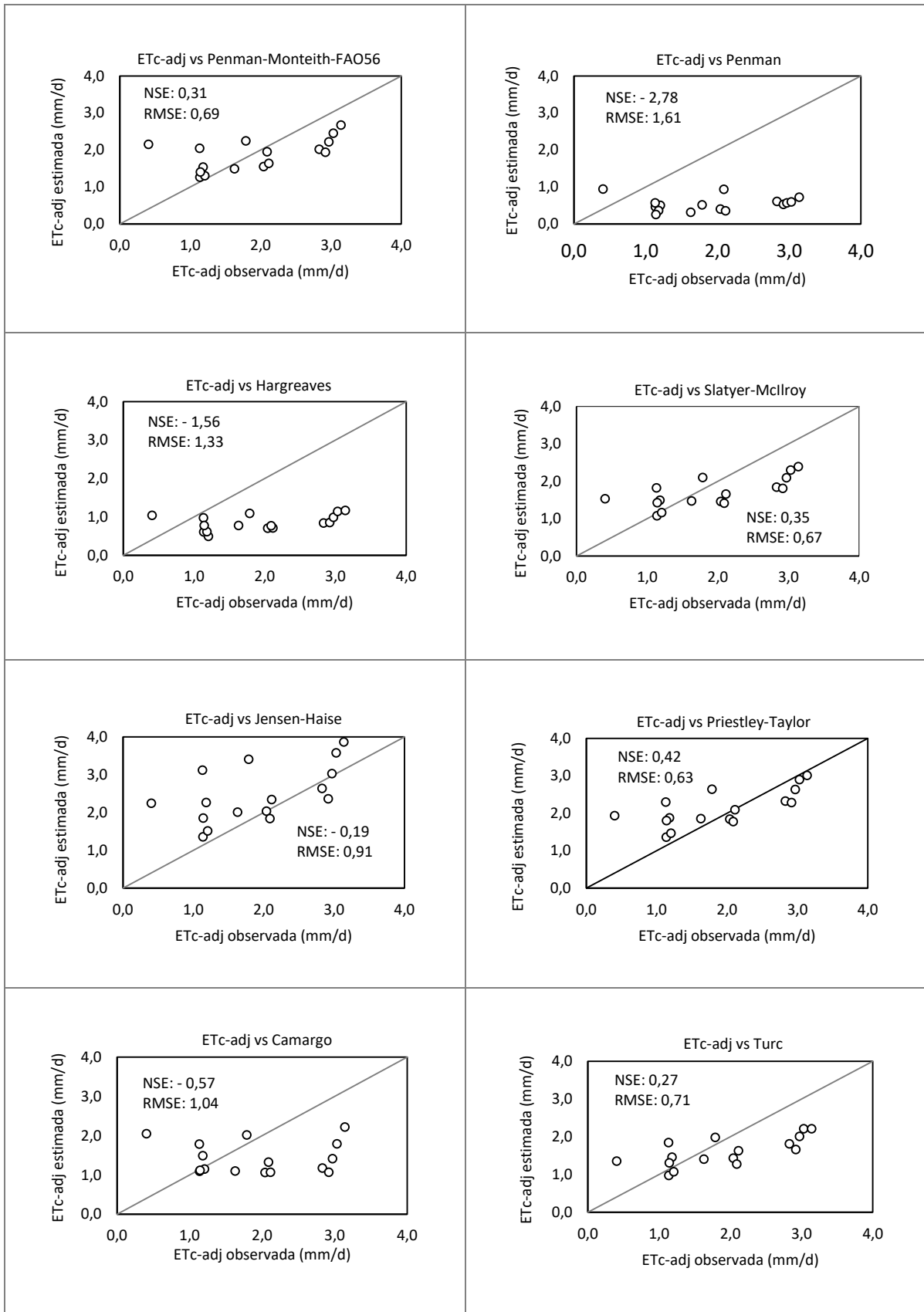


Figura G.3 – Setembro.

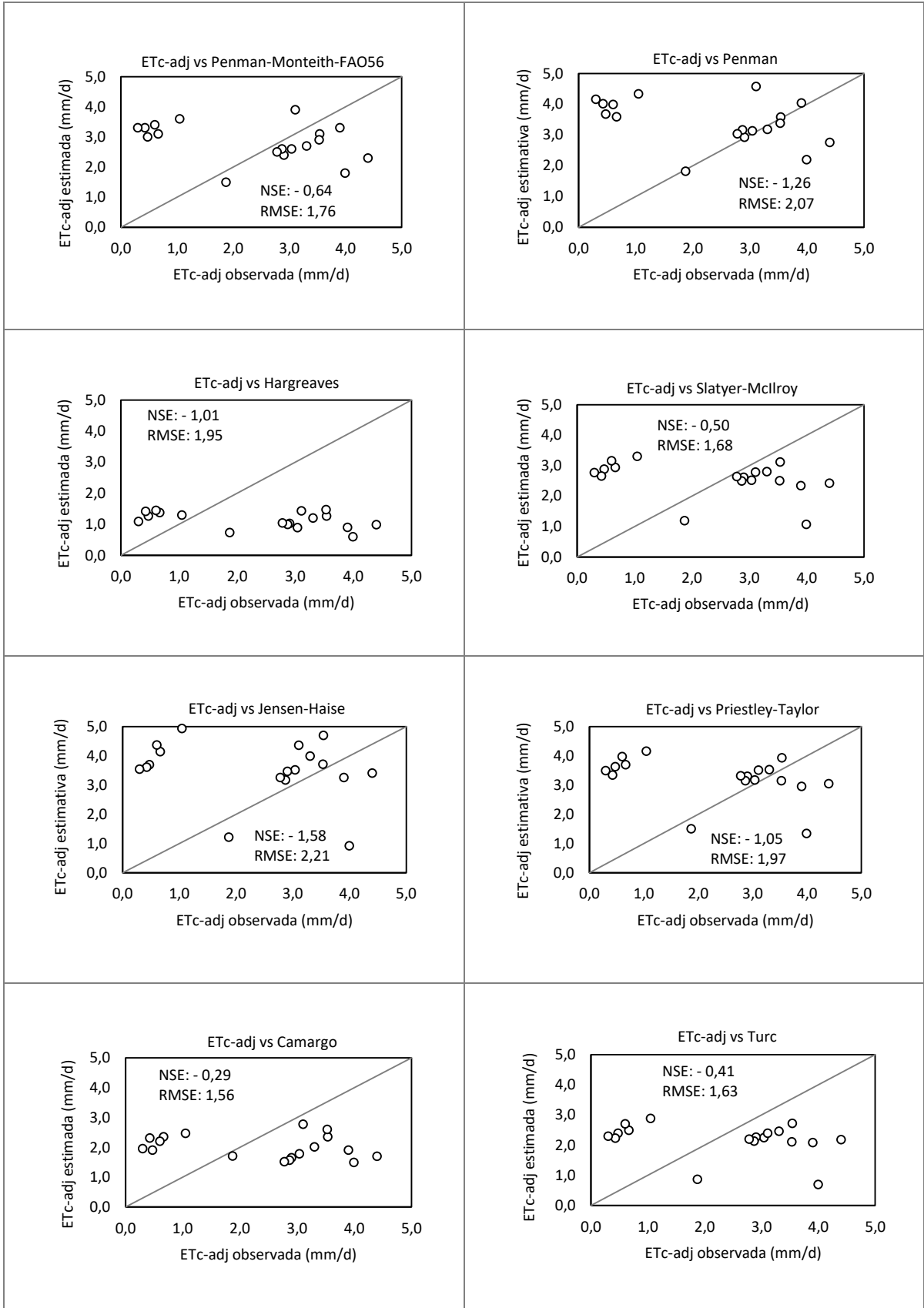


Figura G.4 – Outubro.

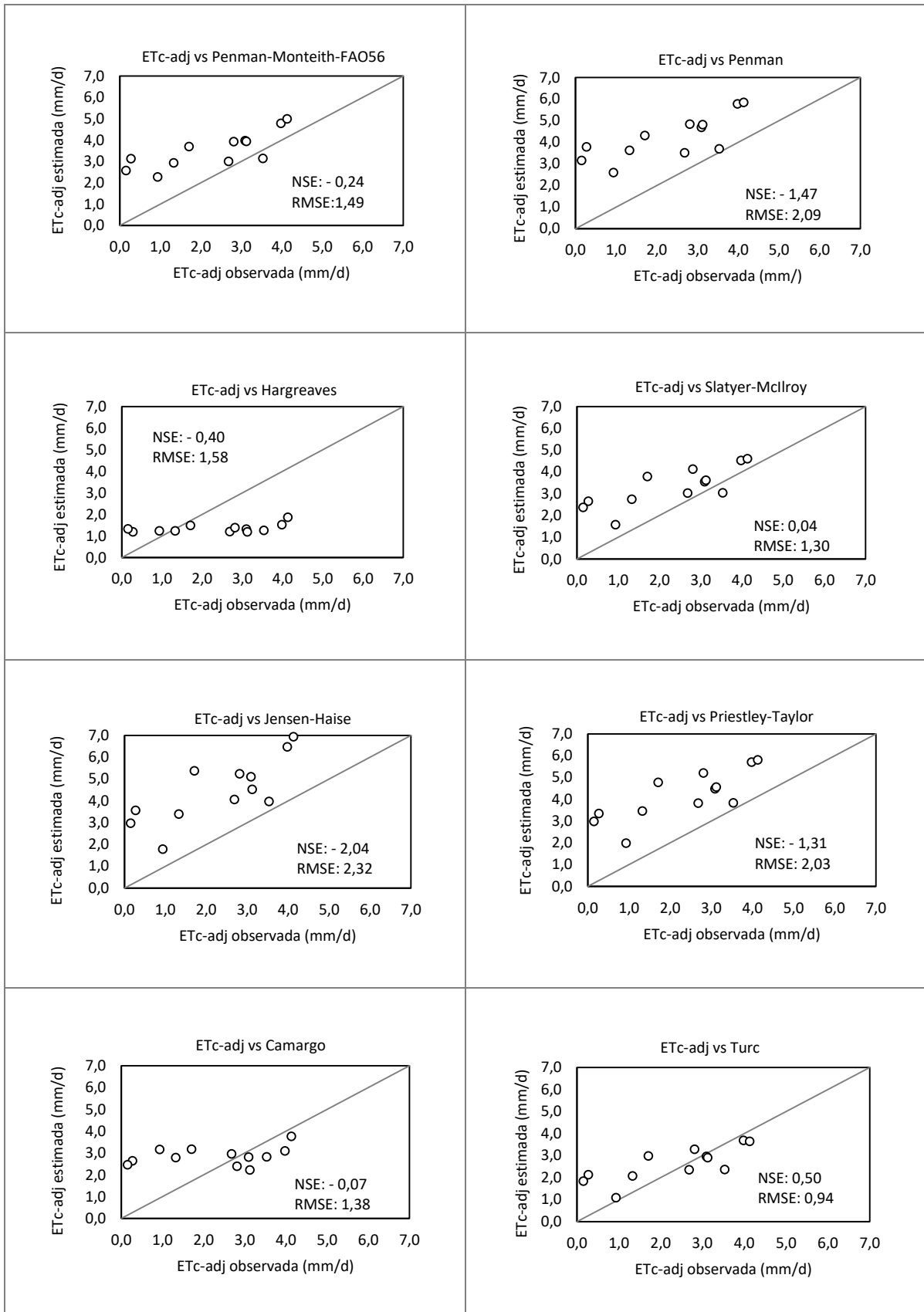


Figura G.5 – Novembro.

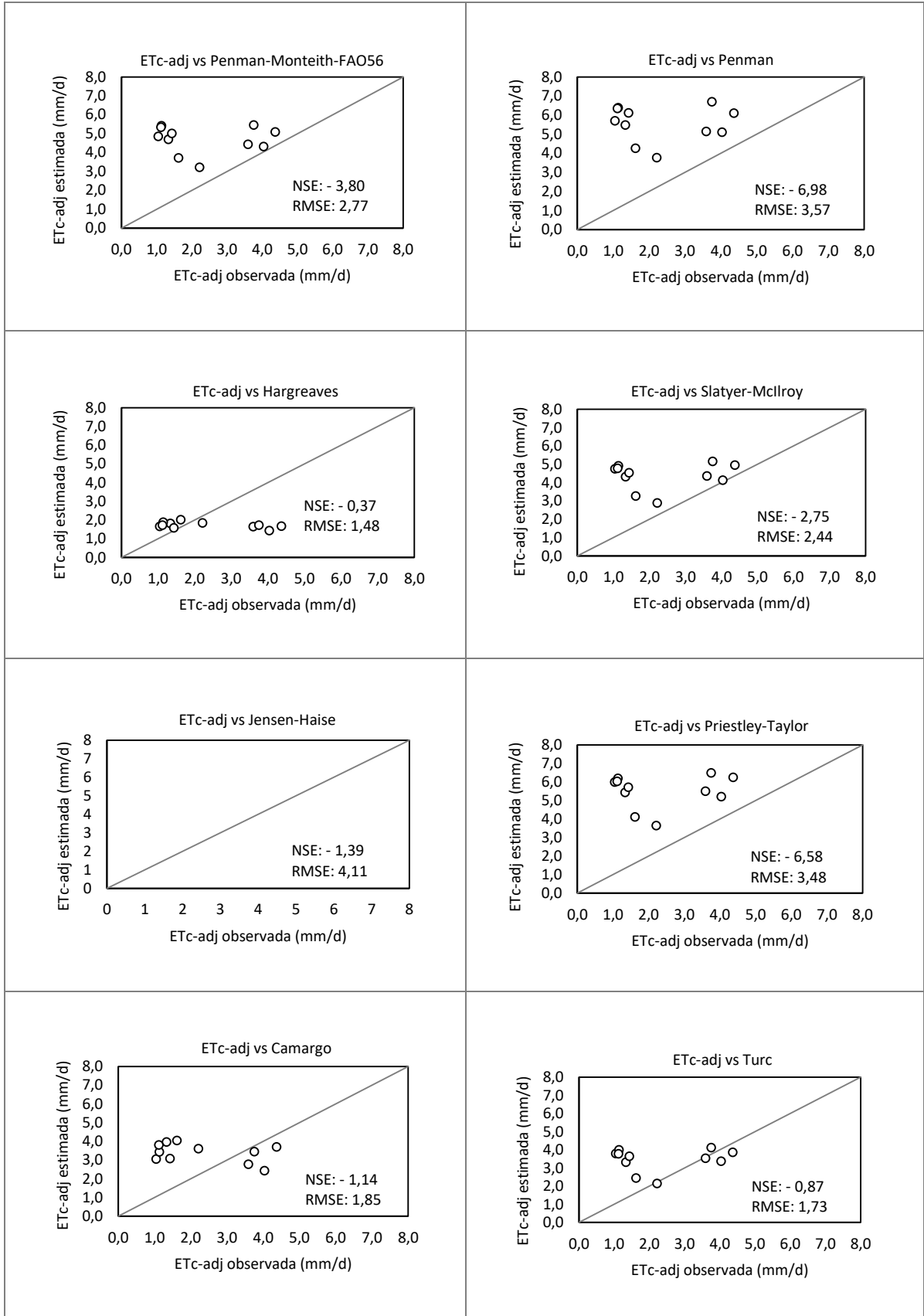


Figura G.6 – Dezembro.

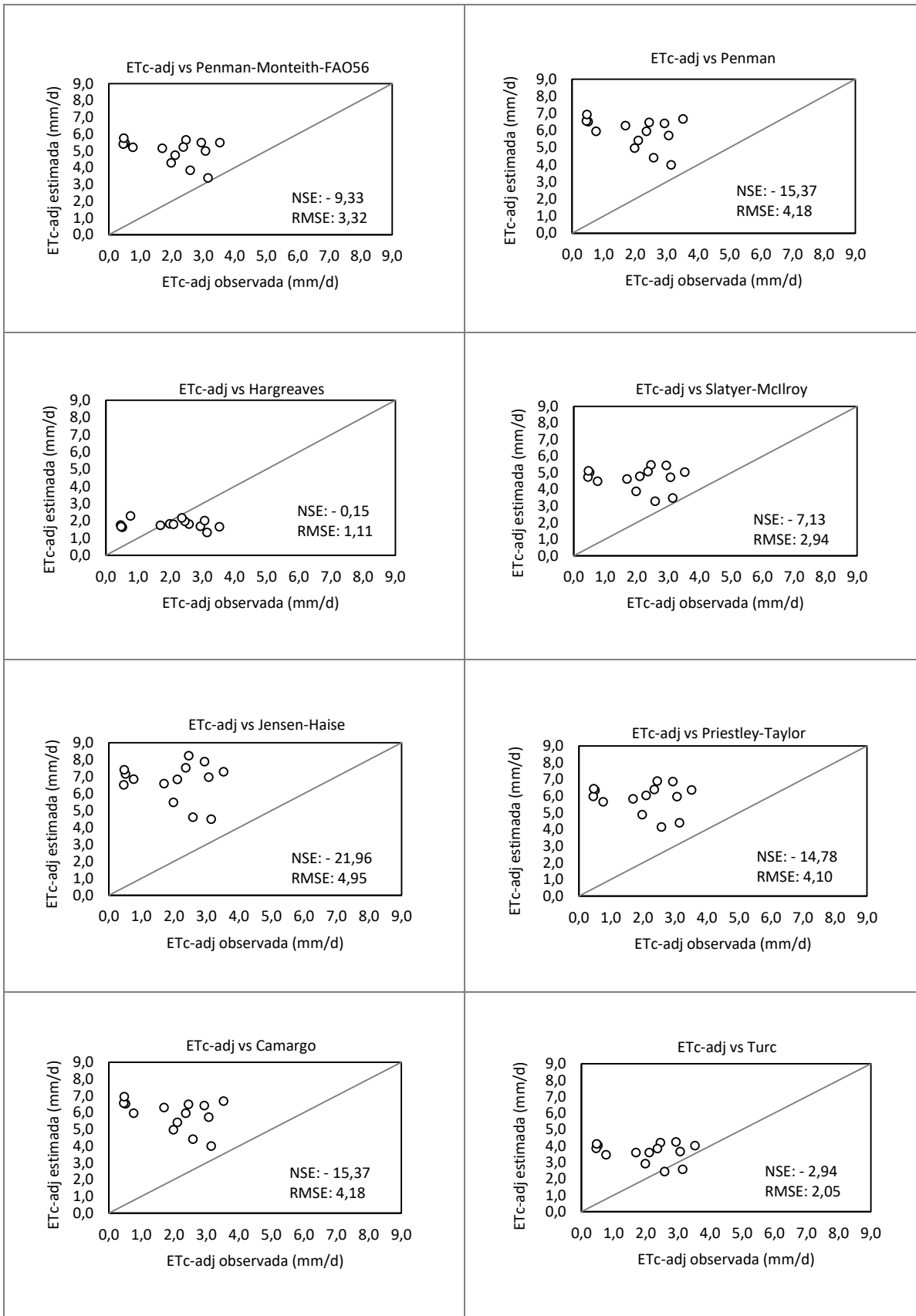


Figura G.7 – Janeiro.

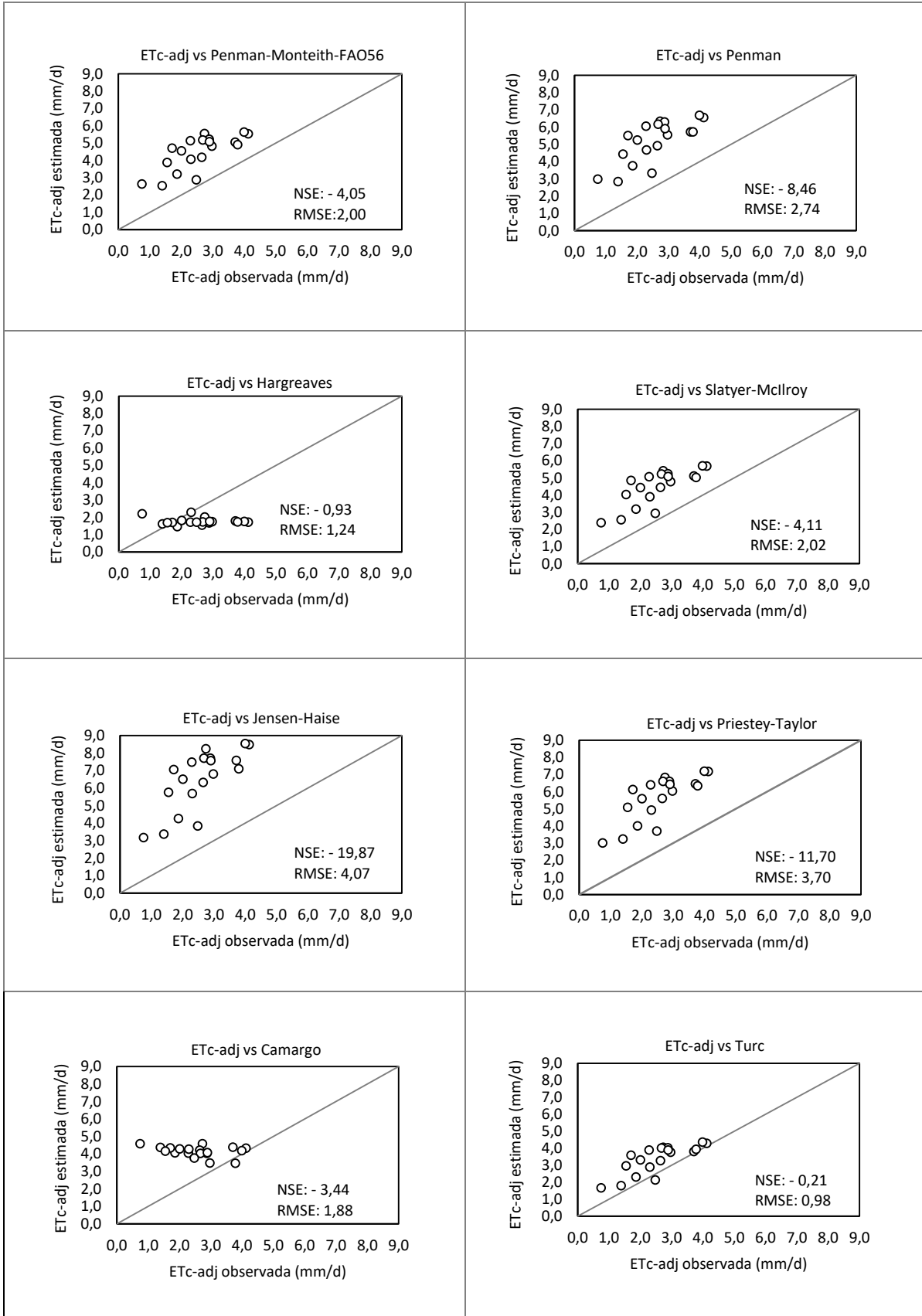


Figura G.8 – Fevereiro.

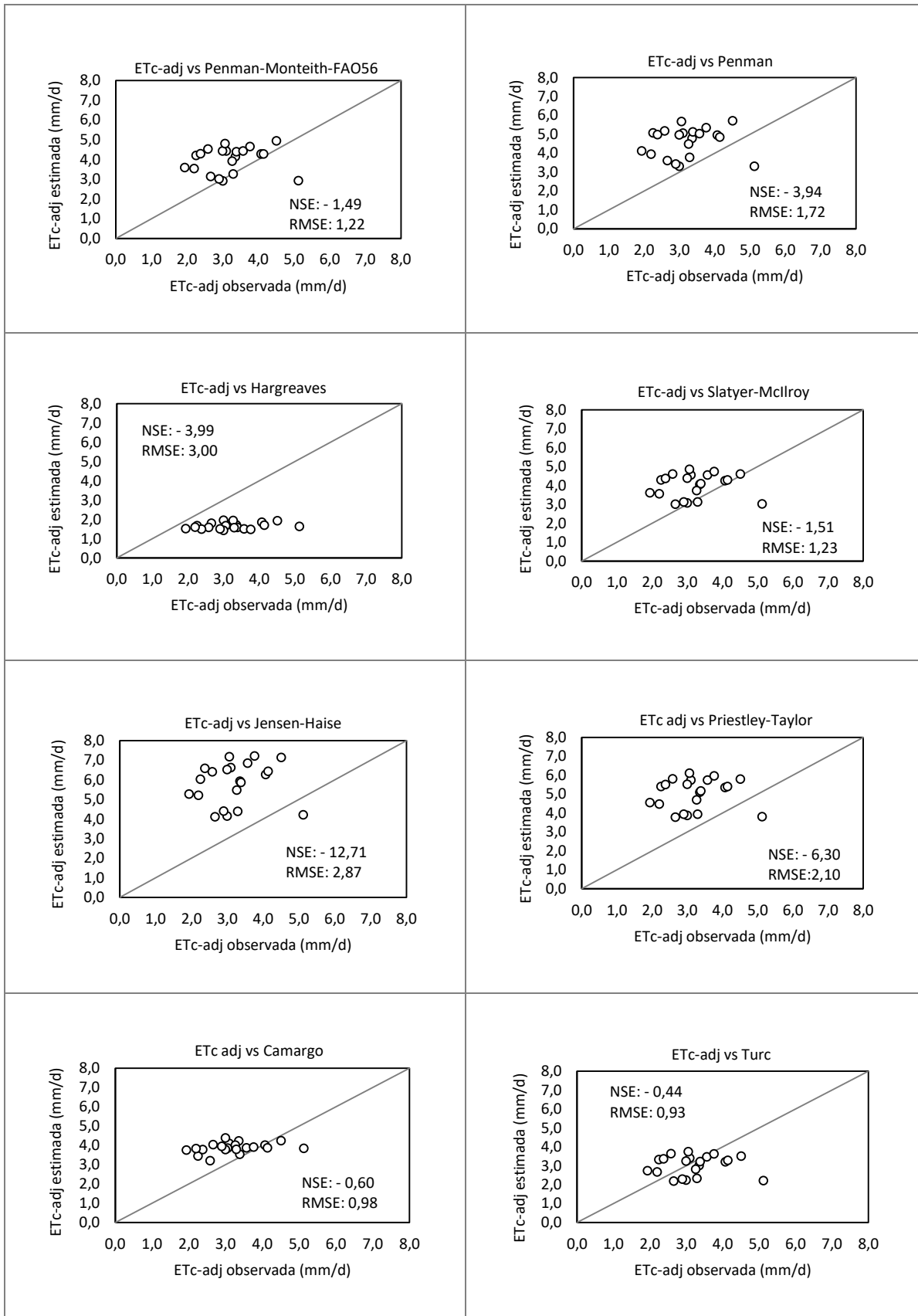


Figura G.9 – Inverno.

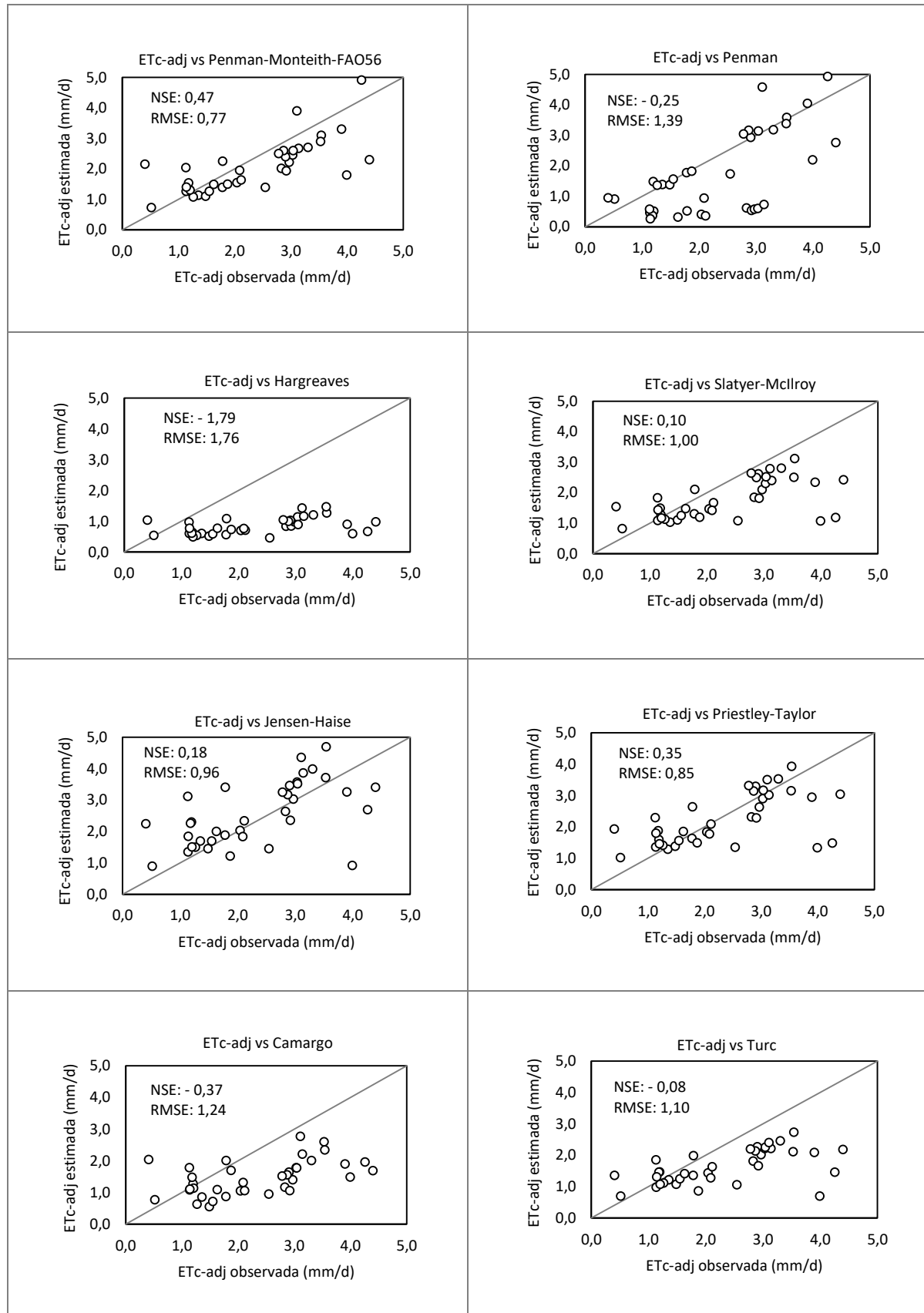


Figura G.10 – Primavera.

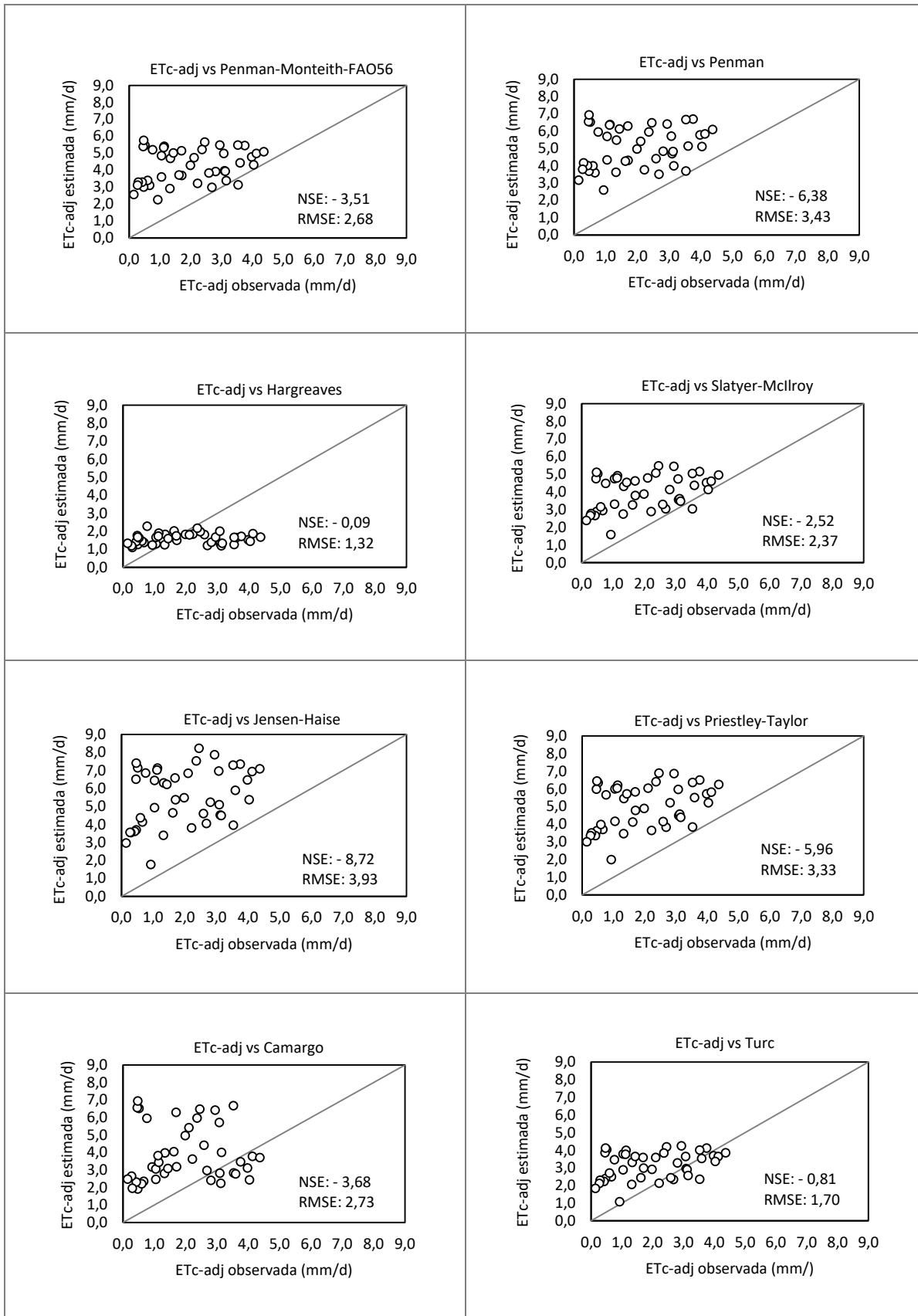


Figura G.1 – Verão.

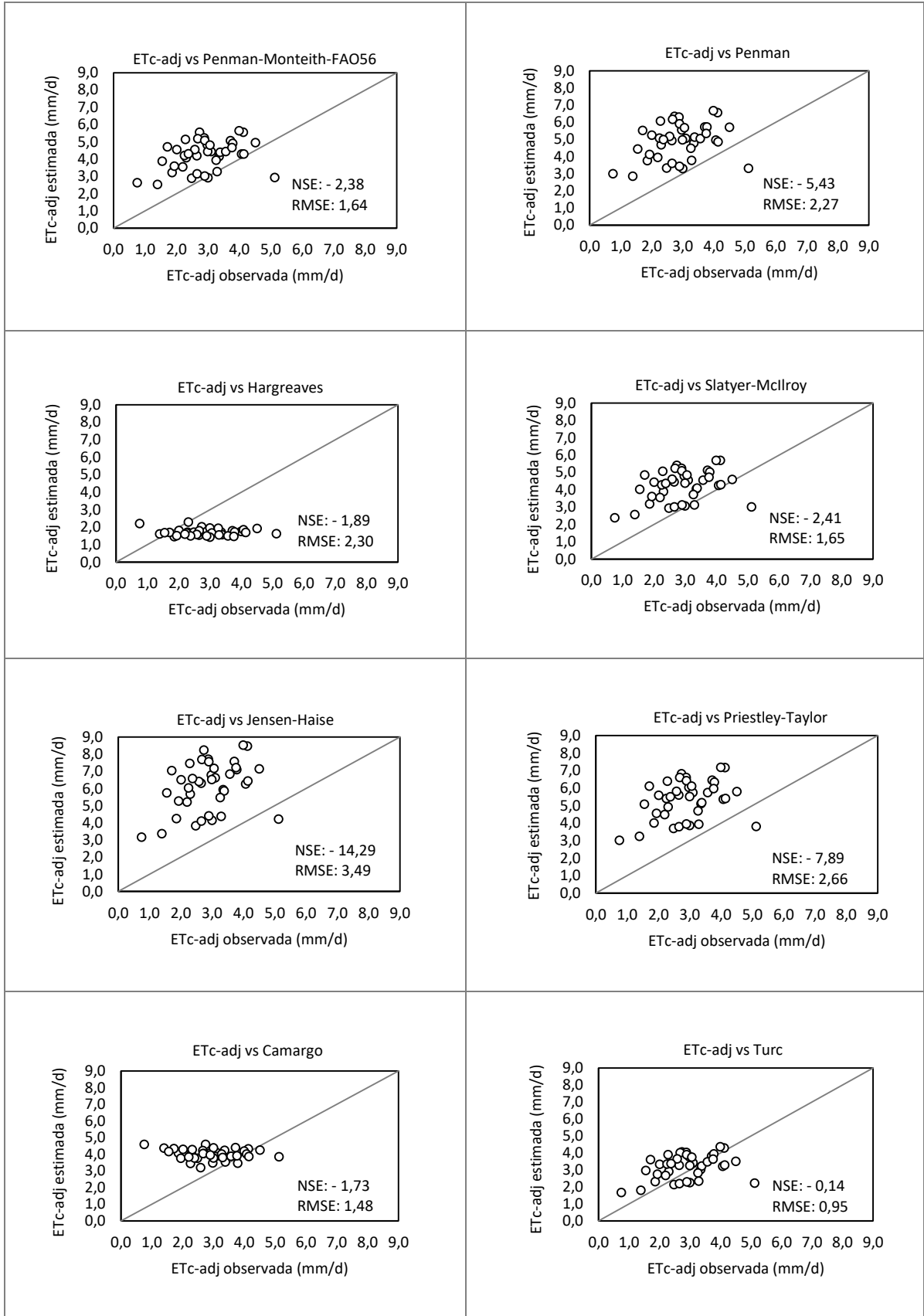
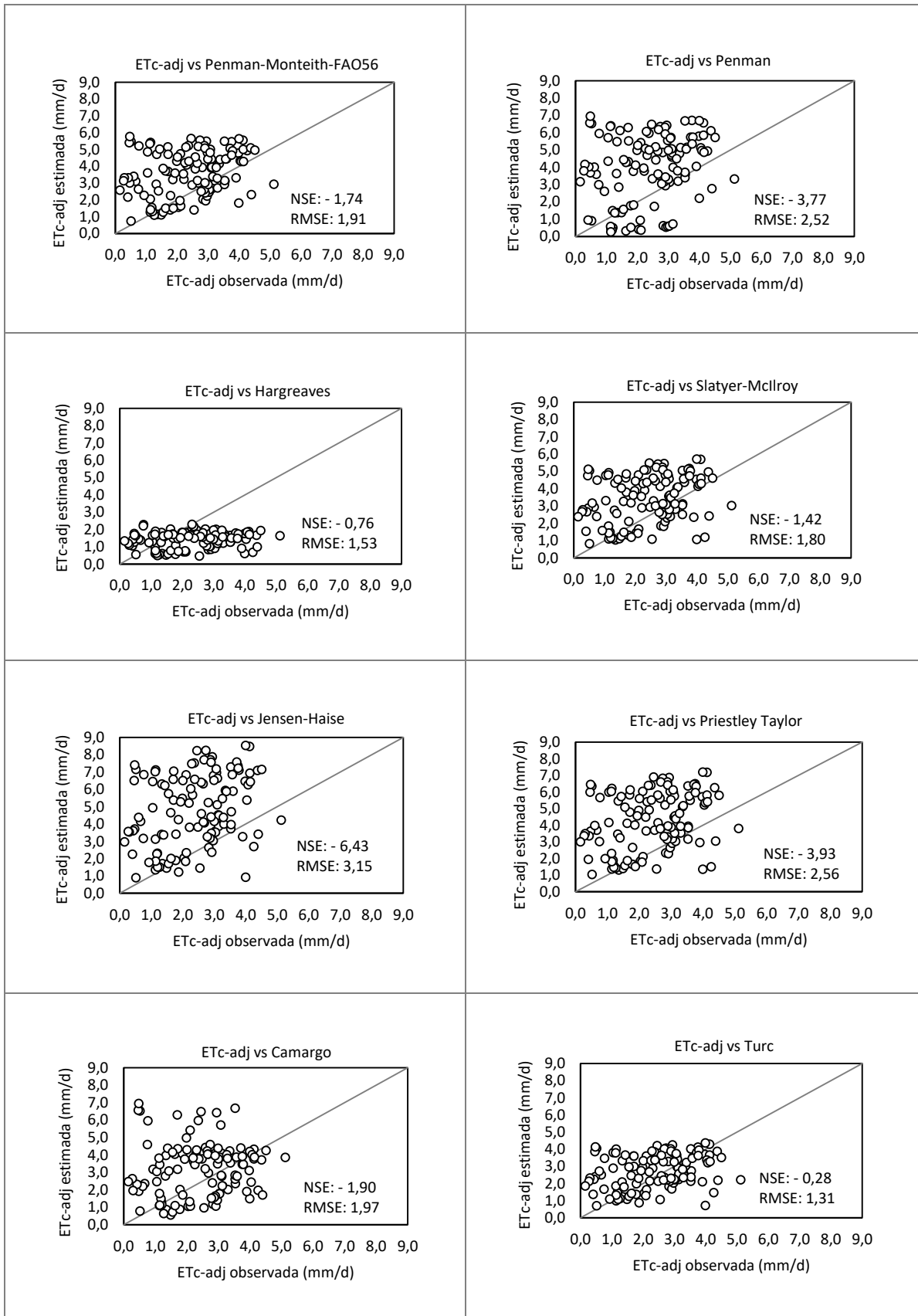


Figura G.12 – Todo o período.



APÊNDICE H – Comparação entre a ET_c vs ET_0 corrigida com K_c .

Tabela H.1 - Resultado da comparação entre ET_c vs ET_0 corrigida com K_c .

Período	ET_0 corrigida com K_c		
	Equação	NSE	RMSE
Julho/2016	Penman	0,86	0,38
	Jensen-Haise	0,27	0,87
Agosto/2016	Priestley-Taylor	0,70	0,48
	Camargo	0,15	0,80
	Slatyer-McIlroy	0,89	0,29
	Turc	0,78	0,41
Setembro/2016	Penman	0,16	0,66
	Slatyer-McIlroy	0,26	0,62
Outubro/2016	Penman	0,58	0,47
	Priestley-Taylor	0,54	0,50
	Camargo	0,39	0,57
	Slatyer-McIlroy	0,92	0,20
Novembro/2016	Turc	0,27	0,63
	Penman	0,62	0,54
	Priestley-Taylor	0,62	0,54
	Slatyer-McIlroy	0,95	0,19
Dezembro/2016	Turc	0,31	0,73
	Penman	0,58	0,43
	Priestley-Taylor	0,41	0,51
	Camargo	0,58	0,43
Janeiro/2017	Slatyer-McIlroy	0,91	0,20
	Penman	0,82	0,49
	Priestley-Taylor	0,53	0,79
	Camargo	0,66	0,68
	Slatyer-McIlroy	1,00	0,07
Fevereiro/2017	Turc	0,65	0,68
	Penman	0,72	0,56
	Priestley-Taylor	0,21	0,95
	Camargo	0,56	0,71
	Slatyer-McIlroy	0,98	0,16
Inverno	Turc	0,16	0,98
	Priestley-Taylor	0,43	0,76
	Camargo	0,14	0,94
	Slatyer-McIlroy	0,52	0,70
Primavera	Turc	0,35	0,82
	Penman	0,63	0,53
	Priestley-Taylor	0,64	0,53
	Camargo	0,22	0,87
	Slatyer-McIlroy	0,92	0,25
Verão	Turc	0,32	0,73
	Penman	0,81	0,53
	Priestley-Taylor	0,48	0,88
	Camargo	0,67	0,70
	Slatyer-McIlroy	0,99	0,12
Todo período	Turc	0,51	0,85
	Penman	0,32	0,88
	Priestley-Taylor	0,53	0,73
	Camargo	0,43	0,81
	Slatyer-McIlroy	0,84	0,42
	Turc	0,44	0,80

