

Universidade Federal de Santa Maria

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM MINI-
TANQUE EVAPORIMÉTRICO

Selso Vieira Costa



UFSM

Santa Maria, RS, Brasil



Dissertação de Mestrado

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM MINI-
TANQUE EVAPORIMÉTRICO

Selso Vieira Costa

PPGEA

Santa Maria, RS, Brasil

2004

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM MINI-TANQUE EVAPORIMÉTRICO

Por

Selso Vieira Costa

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

PPGEA

Santa Maria, RS, Brasil

2004

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A comissão Examinadora , abaixo assinada,
aprova a Dissertação de mestrado

**DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM MINI-TANQUE
EVAPORIMÉTRICO**

elaborada por

Selso Vieira Costa

como requisito parcial para a obtenção de grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

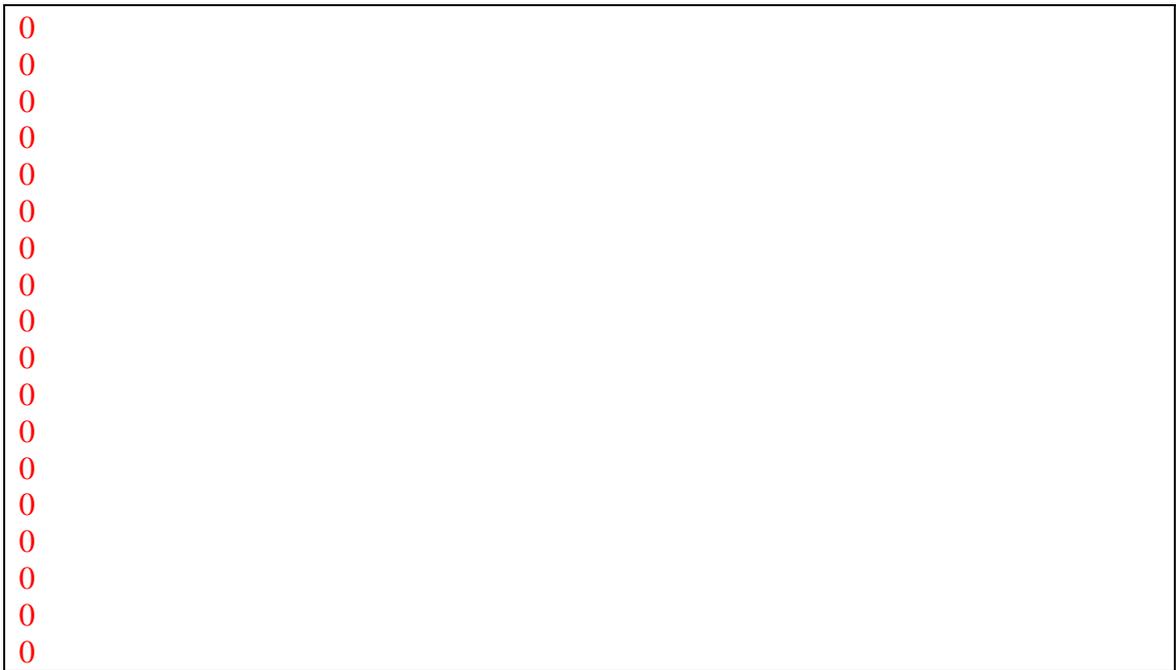
COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina
(Presidente / Orientador)

Prof^ª. Dr^a. Márcia Xavier Peiter

Prof. Dr. Claiton Ruviaro

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2004.



Ficha Catalográfica elaborada por
XXXXXXXXXXXX XXXXXXXX XXXX
Biblioteca Setorial do CCR - UFSM

© 2004
Todos os direitos autorais reservados a Selso Vieira Costa. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho poderá ser feita, desde que citada a fonte.
Endereço: Rua David Barcelos, n° 564 Centro, Cachoeira do Sul, RS,
96630-**XXX**. Fone: (0XX) 51 3722-2912; end. Eletrônico: selso25@hotmail.com

Dedico este trabalho à minha família,
pelo apoio e educação recebidos.

“Aquilo que não nos mata, nos torna mais fortes.”
Friedrich Nietzsche

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, mais especificamente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade oferecida;

Ao CNPq pela bolsa concedida;

Ao prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina pela orientação e aprendizado;

Aos membros da Comissão Examinadora;

Ao Professor Arno Bernardo Heldwein do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, responsável técnico pela Estação Meteorológica, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia pelo fornecimento dos dados da estação e permissão de instalação do experimento junto à estação agrometeorológica;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, em especial a Ercelino Martin Bevilaqua pela cordialidade e disposição;

Ao Bibliotecário Luiz Marchiotti Fernandes pela ajuda e solicitude;

A equipe do Laboratório de Geomática, em especial a Marcelo Calgaro, Ana Caroline Paim Benedetti e aos meus dois “braços direitos”: Ítalo Ludke, Alexandre ten Caten;

Aos Observadores da Estação Meteorológica de Santa Maria: José Francisco Medeiros e Sebastião Rodrigues da Silveira pela disponibilidade e auxílio;

Aos meus pais, Selmis e Sônia, pelo apoio prestado de em todos os sentidos;

E um agradecimento especial à “equipe de revisão”: Sônia M. V. Costa, Juliana Valentini e Otávio M. Dias da Costa pelos relevantes serviços prestados nos últimos momentos.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	ix
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xxi
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1. Conceitos básicos	03
2.1.1. Evaporação	03
2.1.2. Transpiração	03
2.1.3. Evapotranspiração	04
2.1.4. Termos e definições para evapotranspiração	04
2.1.5. Evapotranspiração de referência	06
2.1.6. Coeficiente de cultura	07
2.2. Importância da irrigação	08
2.2.1. Produção de alimentos	08
2.2.2. Rentabilidade ao produtor	09
2.2.3. Perdas por falta de água	09
2.2.4. Problema da escassez de água	10
2.2.5. Política de irrigação no Brasil	11
2.3. Manejo da irrigação	12
2.3.1. Técnicas de controle da irrigação	13
2.3.1.1. Controle de irrigação através de atributos físicos e hídricos do solo	14
2.3.1.2. Controle de irrigação através de características fisiológicas das plantas	15
2.3.1.3. Controle de irrigação através do balanço hídrico na zona radicular	15

2.3.1.4. Controle de irrigação através de modelos micrometeorológicos	15
2.3.1.4.1. Equação de Penman	16
2.3.1.4.2. Método do tanque classe “A”	17
Constituição e características do tanque classe “A”	18
Coeficiente de tanque	19
2.4. Uso de mini-tanques	23
2.5. Análise de dados	26
2.5.1 Considerações sobre erro , desvio ou resíduo	26
2.5.2. Regressão e Mínimos quadrados	28
2.5.3. Precisão e exatidão	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1. Caracterização do local do experimento	33
3.2. Material e construção dos mini-tanques	33
3.3. Fases do trabalho	37
3.4. Metodologia de cálculo	39
3.4.1. Método da equação de Penman-Monteith	39
3.4.1.1. Pressão de saturação do vapor d’água à temperatura do ar.....	39
3.4.1.2. Pressão parcial de vapor	39
3.4.1.3. Declividade da curva de pressão de saturação de vapor	40
3.4.1.4. Constante psicrométrica e constante psicrométrica modificada..	40
3.4.1.5. Balanço de radiação de ondas longas	40
3.4.1.6. Distância relativa sol-Terra	41
3.4.1.7. Declinação solar	41
3.4.1.8. Ângulo horário do pôr-do-sol	41
3.4.1.9. Comprimento astronômico do dia	41
3.4.1.10. Radiação solar incidente no topo da atmosfera	42
3.4.1.11. Radiação solar de ondas curtas incidente	42
3.4.1.12. Balanço de radiação de ondas curtas	43
3.4.1.13. Balanço global de radiação	43

3.4.1.14. Evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman-Monteith	43
3.4.2. Método do tanque classe “A”	43
3.4.2.1. Equação de Snyder para cálculo do K_p	43
3.4.2.2. Evapotranspiração de referência calculada com o método do tanque classe “A”	44
3.4.3. Método do tanque “SM”	44
3.4.3.1. Cálculo do $K_{p_{SM}}$ a partir da equação de Penman-Monteith	44
3.4.3.2. Medida da evaporação no tanque “SM”	44
3.4.3.3. Calibração dos tanques	45
3.4.3.4. Medida da precipitação no tanque “SM”	45
3.5. Parâmetros para análise estatística	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. Análise do tanque “SM” em relação ao tanque classe “A”	47
4.1.1. Fase I	47
4.1.2. Fase II	48
4.1.3. Fase III	52
4.2. Análise do tanque “SM” em relação à equação de Penman-Monteith	55
4.2.1. Determinação dos coeficientes de tanque para os tanques “SM” em função das lâminas evaporadas	55
4.2.2.1. Fase I	56
4.2.2.2. Fase II	58
4.2.2.3. Fase III	61
4.3. Análise do tanque “SM” na estimativa da precipitação em comparação com o pluviômetro	64
4.3.1. Fase I	64
4.3.2. Fase II	65
4.3.4. Fase III	67
4.4. Comentário geral	68

6. CONCLUSÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE SIGLAS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α	coeficiente linear da equação de Angström;
β	coeficiente angular da equação de Angström;
γ^*	constante psicrométrica modificada;
γ	constante psicrométrica;
δ	declinação solar;
σ	constante de Stefan-Boltzman;
ΔA	variação no armazenamento de água no solo;
Δ	tangente à curva de saturação para à temperatura do ar;
a	coeficiente linear de regressão;
atm	atmosfera;
<i>ARM</i>	volume de chuva armazenado no reservatório do tanque “SM”;
b	coeficiente angular de regressão;
B	comprimento da bordadura;
c	coeficiente de desempenho;
CIMIS	Califórnia Irrigation Management and Information System;
d	índice de concordância de Willmont;
D	drenagem profunda;
dr	distância relativa Sol-Terra;
e	pressão parcial de vapor;
e_l	elevação de nível da água no tanque “SM” causada pela chuva;
e_{pe}	erro padrão da estimativa;
e_s	pressão de saturação de vapor;
$(e_s - e)$	déficit de saturação;
E_a	fator aerodinâmico;
E_{abs}	erro absoluto
E_{rel}	erro relativo
ET	Evapotranspiração;
ET _c	evapotranspiração de cultura;
ET _{ca}	evaporação medida no tanque Classe “A”;
ET _{sm}	evaporação medida no tanque “SM”;
ETM	evapotranspiração máxima;

ETO	evapotranspiração de oásis;
ETP	evapotranspiração potencial;
ETR	evapotranspiração real;
ETr ou ETo	evapotranspiração de referência;
ET _{O_{tca}}	evapotranspiração de referência calculado a partir do método do tanque classe "A";
ET _{O_{tsm}}	evapotranspiração de referência calculada a partir do método do tanque "SM";
FAO	Food and Agriculture Organization;
G	densidade de fluxo de calor no solo;
I	irrigação;
J	dia juliano;
Kc	coeficiente de cultura;
Kp	coeficiente de tanque para o tanque classe "A";
K _{pSM}	coeficiente de tanque para o tanque "SM"
K _{0↓}	radiação solar incidente no topo da atmosfera;
K↓	radiação solar de ondas curtas incidente;
K*	balanço de radiação de ondas curtas;
L	calor latente de evaporação;
L _i	leitura do nível da água feita no piezômetro do tanque "SM" para o dia considerado;
L _{i-1}	leitura do nível da água feita no piezômetro do tanque "SM" para o dia anterior ao considerado;
n	insolação diária;
N	comprimento astronômico do dia;
O _x	ordem das observações da variável x;
O _y	ordem das observações de y;
p	tamanho da amostra;
PP	precipitação diária medida no pluviômetro;
r _s	coeficiente de correlação de Spearman;
r ²	coeficiente de determinação;
R	albedo;
ra	resistência do ar ao transporte do calor sensível e vapor d'água

r_c	resistência do dossel à difusão do vapor d'água;
S_R	variância residual;
S_R^2	quadrado da variância residual;
S_x	desvio padrão de x ;
S_{xx}	desvio padrão em x ; ????
S_y	desvio padrão de y ;
S_{xy}	covariância;
Q^*	balanço global de radiação ou saldo de radiação;
q	escoamento superficial;
t	temperatura média diária do ar;
t_9	temperatura do ar média às 9 h;
t_{21}	temperatura do ar medida às 21 h;
t_M	temperatura máxima diária;
t_m	temperatura mínima diária;
t_{p-2}	valor calculado do teste 't' de Student com "p-2" graus de liberdade;
TDR	Time Domain Reflectometer;
u_2	velocidade do vento a dois metros de altura;
u_{10}	velocidade do vento a dez metros de altura;
URA	umidade relativa do ar média;
URA_9	umidade relativa do ar mediada às 9 h;
URA_{15}	umidade relativa do ar média às 15 h;
URA_{21}	umidade relativa do ar medida às 21 h;
W	ângulo horário do pôr-do-sol;
\bar{y}	média dos valores de y ;
x	valores de a ou b estimado através da regressão;
x_0	parâmetros testados para a e b (zero e um, respectivamente);
\bar{x}	média dos valores de x ;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01-	Esquema apresentando a área tampão. Adaptada de PEREIRA, VILLA NOVA & SEDIYAMA (1997).	5
FIGURA 02-	Ilustração das dimensões do tanque classe “A”. Extraída de : Tempo de irrigar: Manual do irrigante – PRONI.	19
FIGURA 03-	Definição visual dos conceitos de precisão e exatidão.	30
FIGURA 04-	Vista da parte inferior do tanque.	35
FIGURA 05-	Vista geral do tanque.	35
FIGURA 06-	Suporte para o tanque.	35
FIGURA 07-	Detalhe da tampa do reservatório.	35
FIGURA 08-	Detalhe do reservatório.	36
FIGURA 09-	Cuba feita com CAP de 200 mm.	36
FIGURA 10-	Vista geral dos tanques (fase IV).	36
FIGURA 11-	Alturas características, do nível da água e do dreno em relação à borda e os diâmetros da cuba e do dreno. Corte transversal à esquerda e vista superior à direita.	38
FIGURA 12-	Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente. PRIMEIRA FASE.	47
FIGURA 13-	Regressão entre os dados do tanque classe “A” e do tanque “SM” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente. PRIMEIRA FASE.	48
FIGURA 14-	Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 1. SEGUNDA FASE.	49

FIGURA 15-	Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 2. SEGUNDA FASE.	49
FIGURA 16-	Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 3. SEGUNDA FASE.	49
FIGURA 17-	Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 1. SEGUNDA FASE.	51
FIGURA 18-	Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 2. SEGUNDA FASE.	51
FIGURA 19-	Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 3. SEGUNDA FASE.	51
FIGURA 20-	Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 1. TERCEIRA FASE.	52
FIGURA 21-	Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 2. TERCEIRA FASE.	52
FIGURA 22-	Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 3. TERCEIRA FASE.	52
FIGURA 23-	Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 1. TERCEIRA FASE.	54
FIGURA 24-	Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 2. TERCEIRA FASE.	54

FIGURA 25-	Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque nº 3. TERCEIRA FASE.	54
FIGURA 26-	Equação de regressão entre as evaporações do tanque “SM” e seus respectivos Kp para a primeira fase.	55
FIGURA 27-	Equação de regressão entre as evaporações do tanque “SM” e seus respectivos Kp para a segunda fase nos tanques nº 1 acima, nº 2 à esquerda e nº 3 à direita.	55
FIGURA 28-	Equação de regressão entre as evaporações do tanque “SM” e seus respectivos Kp para a terceira fase nos tanques nº 1 acima, nº 2 à esquerda e nº 3 à direita.	56
FIGURA 29-	Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente. PRIMEIRA FASE.	56
FIGURA 30-	Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente. PRIMEIRA FASE.	57
FIGURA 31-	Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque nº 1. SEGUNDA FASE.	58
FIGURA 32-	Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque nº 2. SEGUNDA FASE.	58
FIGURA 33-	Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque nº 3. SEGUNDA FASE.	58
FIGURA 36-	Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque nº 3. SEGUNDA FASE.	60

FIGURA 37-	Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 1. TERCEIRA FASE.	61
FIGURA 38-	Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 2. TERCEIRA FASE.	61
FIGURA 39-	Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 3. TERCEIRA FASE.	61
FIGURA 40-	Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 1. TERCEIRA FASE.	63
FIGURA 41-	Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 2. TERCEIRA FASE.	63
FIGURA 42-	Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 3. TERCEIRA FASE.	63
FIGURA 43-	Regressão obtida entre os dados de precipitação do pluviômetro e tanque “SM” à esquerda, e o comportamento da chuva medida em pluviômetro e no tanque “SM” à direita. PRIMEIRA FASE.	65
FIGURA 44-	Comportamento da chuva medida em pluviômetro e no tanque “SM” para o n° 1 acima, n° 2 à esquerda e n° 3 à direita. SEGUNDA FASE.	65
FIGURA 45-	Regressões obtidas entre os dados de precipitação do pluviômetro e tanque “SM” nos tanque 1, 2 e 3 da esquerda para a direita, respectivamente. SEGUNDA FASE.	66
FIGURA 46-	Comportamento da chuva medida em pluviômetro e no tanque “SM” para o n° 1 acima, n° 2 à esquerda e n° 3 à direita. TERCEIRA FASE.	67

FIGURA 47- Regressões obtidas entre os dados de precipitação do pluviômetro e tanque "SM" nos tanque 1, 2 e 3 da esquerda para a direita, respectivamente. TERCEIRA FASE. 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 01-	Valores de $ r $ e sua interpretação segundo LOPES FILHO (2000), adaptada de Crespo (1993) Francisco (1982).	32
Tabela 02-	Critério de interpretação do desempenho de métodos de estimativa da ETP, pelo índice “c”.	32
Tabela 03-	Lista de materiais necessários à construção do tanque e respectivos custos.	34
Tabela 04-	Fases do trabalho e respectivos níveis da água (h1) e dreno (h3) em relação à borda e a diferença de nível entre o dreno e a água (h2), expressos em cm.	38
Tabela 05-	Coeficientes α e β da equação Angström para a região de Santa Maria, determinadas por ESTEFANEL <i>et alli</i> (1990) para os doze meses do ano.	42
Tabela 06-	Valores dos índices estatísticos calculados para as relações entre o método do tanque classe “A” e o do tanque “SM” para a primeira fase do trabalho com períodos quinqüidiais e decendiais.	48
Tabela 07-	Valores dos índices estatísticos calculados para as relações entre o método do tanque classe “A” e o do tanque “SM” para a segunda fase do trabalho com períodos quinqüidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.	50
Tabela 08-	Valores dos índices estatísticos calculados entre o método do tanque classe “A” e do tanque “SM” para a terceira fase do trabalho com períodos quinqüidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.	53
Tabela 09-	Valores dos índices estatísticos calculados entre o método da equação de Penman-Monteith e do tanque “SM” para a primeira fase do trabalho com períodos quinqüidiais e decendiais.	57
Tabela 10-	Valores dos índices estatísticos calculados entre o método da equação de Penman-Monteith e do tanque “SM” para segunda fase do trabalho com períodos quinqüidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.	59

Tabela 11-	Valores dos índices estatísticos calculados entre o método da equação de Penman-Monteith e do tanque “SM” para a terceira fase do trabalho com períodos quinúidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.	62
Tabela 12-	Valores dos índices estatísticos calculados entre a precipitação medida em pluviômetro e no tanque “SM”. PRIMEIRA FASE.	64
Tabela 13-	Valores dos índices estatísticos calculados entre a precipitação medida em pluviômetro e no tanque “SM”. SEGUNDA FASE.	66
Tabela 14-	Valores dos índices estatísticos calculados entre a precipitação medida em pluviômetro e no tanque “SM”. TERCEIRA FASE.	68
Tabela 15-	Coefficientes de correlação de Spearman (r_s) entre os desempenhos (c) e as alturas características dos tanques (h1, h2 e h3) testados através do coeficiente tabelado (r_{tab}) para os métodos de Penman-Monteith e tanque classe “A”.	69
Tabela 16-	Coefficientes de correlação de Spearman (r_s) entre os desempenhos (c) e as alturas características dos tanques (h1, h2 e h3) testados através do coeficiente tabelado (r_{tab}) para a estimativa da chuva.	69

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

Desenvolvimento e calibração de um mini-tanque evaporimétrico

Autor: Selso Vieira Costa
Orientador: Adroaldo Dias Robaina
Santa Maria, 27, de fevereiro de 2004.

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver e calibrar um mini-tanque evaporimétrico, comparando sua evaporação com o tanque classe “A” e sua capacidade de estimar a evapotranspiração de referência com a equação de Penman-Monteith. Este aparelho tem a finalidade de facilitar o controle da irrigação, não necessitando amostragens ou instalação de equipamentos a campo, reduzir custos de mão-de-obra e aquisição de aparelhos sofisticados. Também é intenção com este mini-tanque, não perder leitura em dias de chuva, como ocorre com o evaporímetro padrão (tanque classe “A”), facilitar seu manejo e alcançar estimativas mais próximas dos valores de evapotranspiração de referência calculadas através da equação padrão (Penman-Monteith). O desenvolvimento consistiu da comparação, com os padrões, de diferentes etapas em que usou-se diferentes alturas de borda, dreno e lâmina de água. A calibração deu-se pelo ajuste dos valores da evapotranspiração de referência, feita através da determinação dos coeficientes de tanque ($K_{p_{sm}}$), confrontando-se os valores de evaporação do mini-tanque com a evapotranspiração de referência padrão. Os resultados obtidos mostram que não houve correlação significativa entre as variações das alturas característica dos mini-tanques e os desempenhos, expressados pelo coeficiente “c”, no que diz respeito à evaporação ou evapotranspiração. Quanto à capacidade do tanque “SM” estimar a precipitação ocorrida, pode-se correlacionar a melhora do seu desempenho com o aumento da borda. De modo geral pode-se considerar, em média, que na comparação com o tanque classe “A”, para médias quinqüidiais, o conceito de desempenho como “bom” e para médias decendiais, como “muito bom”, de acordo com a classificação de CAMARGO & CENTELHAS (1997). Na comparação da evapotranspiração calculada pelo método do tanque “SM” com Penman-Monteith, também em média, pode-se considerar para médias quinqüidiais

um desempenho classificado como “mediano” e para decendiais, “bom”. No caso da estimativa da chuva, o desempenho passou de “mediano” à “ótimo” com o aumento da altura da borda. Os coeficientes de regressão - a e b - diferiram estatisticamente de seus parâmetros - zero e um – tanto para a estimativa chuva como para a da evapotranspiração, indicando a necessidade de correção destes valores. Se consideradas as relações entre as evaporações do tanque “SM” e do classe “A” , estes coeficientes não diferem de zero e um para as médias decendiais, porém usando-se as quinquidiais, o coeficiente linear passa a diferir de zero. Para se fazer estas correções, no entanto, necessita-se de um maior número de dados para que se tenham valores mais confiáveis. Como conclusão tem-se que para os dados obtido o mini-tanque foi capaz de estimar bem as evaporações do tanque classe “A” e a precipitação ocorrida, e de forma razoável a evapotranspiração de referência, apesar da necessidade de correção dos valores. Além disso, pode-se concluir que as alturas características não influem nos valores da evaporação ou evapotranspiração, mas que têm correlação com a chuva. Sabe-se, porém que estes dados são parciais e que para inferir de forma definitiva sobre a eficácia deste aparelho, é necessário que se prolongue o experimento por mais alguns anos e que este seja instalado também em outros locais.

ABSTRACT

Master Dissertation
Program of Degree in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil.

Development and calibration of a small evaporation pan.

Author: Selso Vieira Costa
Advisor: Adroaldo Dias Robaina
Santa Maria, February 27, 2004.

The present work had as aim a development and calibration of a small evaporation pan comparing its evaporation with class "A" pan and its capability to estimate the reference evapotranspiration comparing it with the Penman-Monteith equation. This tool has the finality to facilitate the irrigation control, not being necessary to sample or to install equipment in the field, thus decreasing work and material acquisition costs. Also, is intention whit this apparatus to not loose data at rainy days as occurs with the standard one (class "A" pan), make easier its management and reach closest estimates to reference evapotranspiration calculate by standard equation (Penman-Monteith). The development had consisted in a comparison, with patterns, of different phases in witch had used different hem, drain and water level height. The calibration had done by the adjusting of the values of reference evapotranspiration done through pan coefficient determination ($K_{p_{sm}}$) contrasting small pan evaporation with standard evapotranspiration. Obtained results show a no significant correlation between characteristic height and pan performing expressed by "c" coefficient in relation to evaporation and evapotranspiration. Considering the "SM" pan capacity in estimate the rain height, is possible to correlate its performing to hem rising. In height lines we can consider, as average, that comparing whit class "A" pan, to five days average, the performing account as "good" and to ten days average as "very good" according to CAMARGO & CENTELHAS (1997) classification. At the comparison between the "SM" pan and Penman-Monteith methods, also as average, can be consider to five days average a performing account classify as "ordinary" and for ten days average as "good". In case of rainy estimative, the performing rises from "ordinary" to "excellent" with the skirt rising. The regression coefficients - a and b -

statically disagree from its patterns - zero and one – as rain as evapotranspiration estimates, pointing the necessity of these values correction. Whether considered the relation between “SM” and class “A” pans, these coefficients do not disagree from one and zero to ten days average, however using five days averages, the linear coefficient became disagree from zero. To make this corrections, meanwhile, is necessary a bigger data period to have more confidence values. In short, to obtained data, the small pan was capable to estimate well the evaporation measured at class “A” pan and the occurred rain and reasonable the reference evapotranspiration in spite of correction necessity. More over can be concluded that characteristic heights do not influence at evaporation and evapotranpirations values, but it does at the rain. It is known, however, this data are partial and to infer definitely on this tool efficiency it is necessary lengthen the experiment for some years and had placed at other sites.

1- INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada vem tomando importância no Brasil, tanto em termos de área cultivada como em termos de volume de produção. As culturas conduzidas sob esta ferramenta tecnológica alcançam produtividades superiores às conseguidas sem a suplementação hídrica. Isto se deve ao fato da falta de chuvas ser um dos principais fatores redutores de produtividade. Uma noção da extensão e da importância da irrigação para a agricultura em geral é dada por PAZ *et. alli* apud CARLESSO *et alli* (2001), em que relata que 5% da área cultivada no Brasil é irrigada, e esta corresponde a 16% do total da produção e de 35 % do valor econômico.

A tendência para os próximos anos é de que os agricultores busquem cada vez mais a garantia de produtividade via irrigação. Esta tendência, porém, leva a uma competição pelos recursos hídricos, tanto entre os irrigantes como entre estes e outros usuários da água. Além disso, o aumento do número de irrigantes tende a reduzir as vantagens econômicas que têm as lavouras irrigadas em anos secos, épocas onde os preços tendem a ficar acima da média, o que justificaria os investimentos em equipamentos de irrigação.

Assim, deduz-se uma outra tendência neste setor do agronegócio: a busca pela eficiência no uso da água. Para isso, é fundamental o conhecimento do momento correto da aplicação e da quantidade de água requerida pela cultura em questão. O manejo adequado da irrigação evita a aplicação excessiva ou deficiente de água, economizando-se assim, água e energia.

A quantidade a ser aplicada e o momento desta aplicação dependem da cultura, do solo, da produtividade relativa esperada e dos fatores climáticos. Segundo BERNARDO (1989), para determiná-los, existem vários métodos como a medição do teor de água no solo, medição da tensão da água no solo, determinação da evapotranspiração, dentre outros. O primeiro pode ser feito de modo direto ou indireto e é bastante preciso, porém demanda muita mão-de-obra. O segundo, também preciso, necessita da instalação de equipamentos na lavoura, como os tensiômetros, que são de fácil perda ou avaria. Já o terceiro

pode ser feito por meio direto, através de lisímetros, ou indireto, usando-se equações que correlacionam a evapotranspiração com fatores micrometeorológicos e medidas feitas em tanques evaporimétricos.

Os lisímetros são o modo mais preciso de se determinar a evapotranspiração, porém são caros, de difícil instalação e manejo. O uso de equações necessita da instalação de uma série de aparelhos para determinar os parâmetros necessários, e sua leitura deve ser feita diariamente de forma sistemática. Os modelos devem ser avaliados e calibrados para cada região.

Uma das técnicas mais difundidas no controle da irrigação é o uso do tanque classe "A". Neste caso, com a aplicação dos coeficientes de tanque e de cultura sobre a evaporação medida, chega-se a uma estimativa da evapotranspiração do período e local em questão. Este método é muito prático, pois não necessita das periódicas amostragens como nos métodos de determinação da umidade do solo.

O tanque classe "A" tem, porém, algumas desvantagens como o custo relativamente alto para pequenas áreas. A perda da leitura em caso de transbordamento em dias de chuva excessiva e a correlação deficiente, em alguns locais, em relação à equação de Penman-Monteith - método tomado como padrão pela FAO, por ter a melhor correlação com dados medidos em lisímetros de pesagem de alta precisão.

No intuito de contribuir para a redução destas deficiências, desenvolveu-se um mini-tanque evaporimétrico que tem como proposta reduzir custo, evitar a perda por transbordamento, melhorar a correlação com a equação padrão e facilitar o manejo do equipamento.

Assim, este trabalho visa apresentar os dados de testes feitos no desenvolvimento deste protótipo, ainda que se devam fazer testes com períodos mais longos e em regiões diferentes para atestar a real eficácia deste aparelho.

2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Conceitos básicos

2.1.1. Evaporação

Segundo PEREIRA *et alli* (1997), a evaporação é um processo endotérmico, transformando a energia externa ao sistema em calor latente (L). Este, geralmente expresso em $J.g^{-1}$, também pode ser dado em termos de lâmina de água, o que facilita a sua comparação com a precipitação e outros fatores hidro-climatológicos, valendo aproximadamente $245 J.mm^{-1}$. Este número pode ser considerado constante, pois nas condições naturais o calor latente é tido como uma função fraca da temperatura.

MATZENAUER (1992) afirma que a evaporação da água do solo se dá em duas fases. A primeira tem a duração influenciada pela taxa de evaporação, profundidade e propriedades hidráulicas do solo e se dá quando este está úmido. Na segunda, quando a superfície já está seca, o vapor d'água sai por difusão molecular, sendo a condutividade hidráulica o fator de maior importância. Nesta fase, há uma diminuição considerável da taxa de evaporação.

Por outro lado, a intensidade da evaporação no solo está condicionada à energia calórica e regime de ventos, que interagem com o tipo de solo, lençol freático, cobertura vegetal e latitude.

2.1.2. Transpiração

A transpiração, segundo PEREIRA *et alli* (1997), é a evaporação da água que foi utilizada nos diversos processos metabólicos da planta. MATZENAUER (1992) sustenta que todas as partes da planta perdem água, sendo que a maior parte se dá nas folhas. MOTTA (1989) acrescenta que “este processo pode ser descrito fisicamente em termos de uma resistência à difusão

e do fluxo turbulento do vapor para o meio exterior”. Para REICHARDT (1990), este é um processo desejável, ao contrário da evaporação do solo, pois esta água, que passa pela planta, participa dos processos metabólicos. Informa ainda que, em uma cultura bem estabelecida e desenvolvida, a taxa de transpiração supera a de evaporação.

2.1.3. Evapotranspiração

Segundo PEREIRA *et alli* (1997), o termo “uso consuntivo” (introduzido por BLANEY & CRIDLE e muito usado em projetos de irrigação) que definia o consumo de água pela planta, foi substituído por “evapotranspiração”.

Esta palavra, que une a evaporação com a transpiração das plantas de uma superfície, surgiu em 1948 no artigo publicado por Warren Thornthwaite denominado de “An Approache towards a rational classification of climate” (SEDIYAMA , 1996).

Segundo CHANG *apud* MATZENAUER (1992), evapotranspiração é a “evaporação de toda a superfície de um certo local mais a transpiração das plantas no mesmo sítio”. REICHARDT (1990) define como “a transferência de água na forma de vapor do sistema solo-planta para a atmosfera” e comenta que esta pode chegar a 10 mm.d^{-1} em regiões tropicais com dia ensolarado, baixa umidade do ar e velocidade do vento razoável.

A evapotranspiração é influenciada, segundo MATZENAUER (1992), pela disponibilidade de água no solo e pela demanda atmosférica. PEREIRA *et alli* (1997), acrescentam aos fatores anteriores a disponibilidade de energia e discorrem sobre os desdobramentos destes.

2.1.4. Termos e definições para evapotranspiração

Existem muitos termos utilizados para definir a evapotranspiração sob diferentes condições, o que leva, muitas vezes, a dúvidas sobre o emprego

correto destes. Abaixo segue um breve resumo das considerações feitas por PEREIRA, *et alli* (1997) a respeito do assunto :

A evapotranspiração potencial (ETP) é “a água utilizada por uma extensa superfície vegetada, em crescimento ativo e cobrindo totalmente o terreno, estando este bem suprido de umidade, ou seja em nenhum instante a demanda atmosférica é restringida pela falta de água” (THORNTHWAITE, 1946). PENMAN (1956) acrescentou a esta definição que a superfície vegetada deveria ser baixa e de altura uniforme. Por “extensa” entende-se uma área suficientemente grande para que a evapotranspiração seja resultante somente das trocas verticais de energia e limitada apenas pela disponibilidade de radiação solar. Para isso, deve haver uma área tampão onde, desde a entrada da massa de ar até o local onde é medida, a evapotranspiração passe a ser mínima para o local. A área tampão pode ser observada na Figura 1, adaptada da original que é apresentada no referido texto.

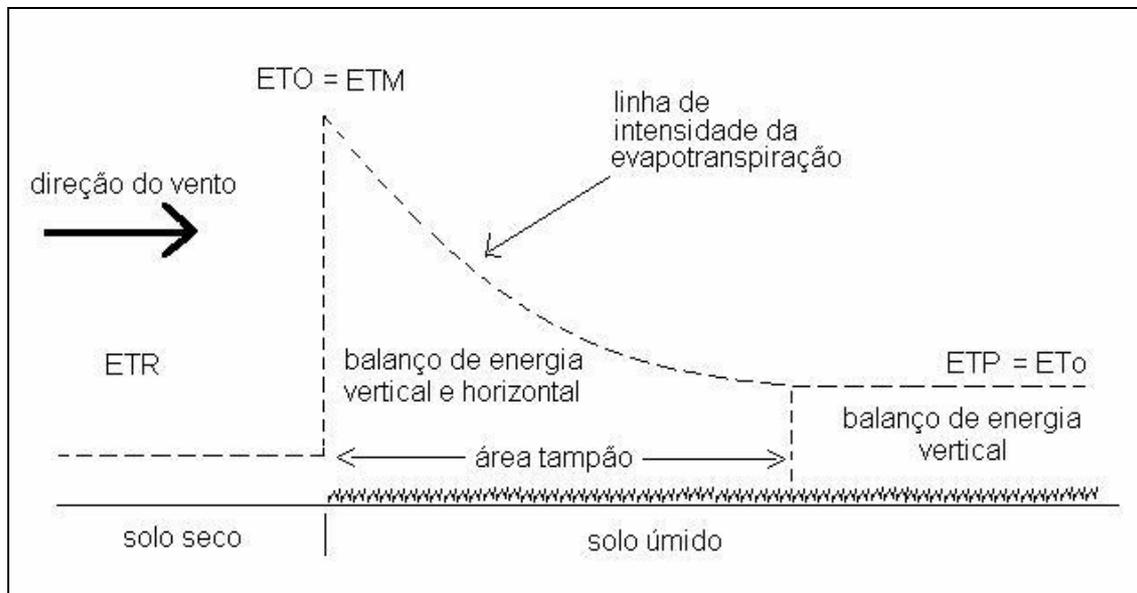


Figura 1. Esquema apresentando a área tampão. Adaptada de PEREIRA *et alli* (1997).

A evapotranspiração de oásis (ETO) ocorre quando uma pequena área irrigada é rodeada por extensas áreas secas ou na área tampão comentada acima. Para os autores, nesta situação ocorre a evapotranspiração máxima.

A evapotranspiração real (ETR) é a que ocorre numa área qualquer independente das suas condições. Segundo MATZENAUER (1992), os fatores meteorológicos são preponderantes na magnitude da evapotranspiração, porém, as características associadas ao tipo de solo, fertilidade, época de semeadura, híbrido utilizado e práticas culturais, dentre outros, também exercem influência no consumo de água.

A evapotranspiração de cultura (ETc), chamada também, por vários autores de “evapotranspiração potencial da cultura” ou de “evapotranspiração máxima” , é definida como a que ocorre quando se têm ótimas condições de umidade e nutrientes no solo de modo a expressar a produção potencial nas condições de campo (BERNARDO, 1989).

O termo evapotranspiração máxima (ETM) é desaconselhado pelos autores, pois é usada por outros pesquisadores como sinônimo de ETP ou ETc, gerando confusão.

Nesta dissertação, porém, por questões de padronização da linguagem, será utilizado o termo ETc no lugar de ETM e “evapotranspiração potencial da cultura”.

A evapotranspiração de referência, definição de maior interesse para este trabalho, será descrita separadamente no item abaixo com mais detalhes.

2.1.5. Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ETr ou ETo) é um termo que vem sofrendo modificações ao longo do tempo. Em 1971, JENSEN *et alli* definiram-no como a “evapotranspiração máxima ocorrida numa cultura de alfafa (*Medicago sativa*) com altura entre 30 e 50 cm numa dada condição climática com 100 m de área tampão”. Usavam a alfafa, pois consideravam-na mais representativa das culturas que a grama devido a sua rugosidade. No ano de 1977, após uma reunião para rever o “Irrigation and Drainage Paper 24” (FAO-24), DOORENBOS & PRUITT (1977) definiram-na como a de uma extensa área de grama com altura entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo

totalmente o solo e sem deficiência hídrica, coincidindo com a definição de evapotranspiração potencial (SEDIYAMA, 1996). Segundo MACHADO & MATTOS (2000), “visando padronizar a definição de evapotranspiração de referência dada por diversos autores, surgiu a necessidade de se defini-la como a evapotranspiração potencial para uma cultura hipotética”. Por esta razão, após a reunião realizada em Roma em 1990, definiu-se a evapotranspiração de referência como aquela igual à de uma cultura hipotética com as seguintes características : 12 cm de altura, albedo de 0,23 e resistência ao transporte de vapor de 70 s.m^{-1} , o que corresponde a um gramado de altura uniforme, em crescimento ativo e sem falta de água. Novamente, igualam-se os conceitos de ETo e ETP.

A estimativa correta e precisa da ETo é essencial para projetos de recursos hídricos em geral e, particularmente importantes, para o planejamento e manejo de sistemas de irrigação (HARGREAVES, 1994; TURCO *et alli*, 2000; GEORGE *et alli*, 2002; GRISMER *et alli*, 2002).

No entanto, no controle da irrigação, necessita-se saber a evapotranspiração que está ocorrendo no campo, ou seja, saber a ETR ou mais especificamente a ETc. Para determinar evapotranspiração real de uma superfície vegetada, deve-se fazer o processo em dois passos. Primeiramente estima-se a ETo por fórmulas indiretas, empíricas ou racionais, e depois multiplica-se este por um coeficiente de proporcionalidade, também chamado coeficiente de cultura (Kc) (CHIN & ZHAO, 1995; MACHADO & MATTOS, 2000).

2.1.6. Coeficiente de cultura

Devido às diferenças na interface cultura-atmosfera entre a grama, usada como referência para a determinação da ETo, e as diferentes culturas nos seus diferentes estágios de crescimento, usa-se o coeficiente de cultura para relacionar ETo e ETc (REICHARDT, 1990 ; PEREIRA, *et alli*, 1997), o que pode ser expresso pela seguinte equação:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1)$$

O coeficiente K_c varia durante o ciclo de uma cultura anual, de acordo com a porcentagem de cobertura do solo. Segundo MATZENAUER (1992), a evapotranspiração não depende somente da demanda atmosférica, mas também do crescimento e desenvolvimento da planta.

Normalmente divide-se os ciclos das culturas em quatro ou cinco estágios de desenvolvimento. No início, quando a cobertura do solo é incompleta, seu valor é baixo, entre 0,2 e 0,5; passando a valores entre 0,75 e 1,15 na fase de maior consumo, geralmente na reprodutiva. Entre estas fases o incremento do valor de K_c é associado ao aumento da área foliar. Após a fase reprodutiva, o K_c volta a decrescer devido à redução da atividade fotossintética (MATZENAUER *et alli*, 1998).

2.2. Importância da irrigação

2.2.1. Produção de alimentos

Segundo TIBAU (1976), a água é parte integrante da formação dos alimentos, por isso, a prática da agricultura impõe, para segurança de seu êxito, o suprimento de água quando insuficiente. Por tal razão, as primeiras aglomerações humanas no ocidente, assentadas onde a chuva era escassa ou irregular, obrigaram-se a construir grandes obras hidráulicas.

De acordo com AMORIN NETO (1981), a crescente demanda de alimentos obriga a nação a produzir, tanto para suprir o consumo interno, como para gerar saldos em exportações. Para este fim, estão sendo utilizadas áreas, antes impróprias para o cultivo devido à indisponibilidade de água, que com o auxílio da irrigação se tornaram viáveis.

CARLESSO *et alli* (2001) relata que a agricultura irrigada é a forma mais eficiente de aumentar a produção de alimentos, pois permite o incremento na

produtividade, sendo usada de forma suplementar em ambiente úmidos e sub-úmidos nos períodos de deficiência hídrica.

2.2.2. Rentabilidade ao produtor

TIBAU (1976) afirma que hoje em dia, quando a produtividade e a garantia passaram a constituir elemento preponderante para a viabilidade econômica, a irrigação impõe-se para que o empreendimento seja coroado com o sucesso.

Uma produção eficiente e rentável deve constituir um dos principais objetivos econômicos de uma empresa agrícola. Para isso os fatores de produção devem ser utilizados de tal maneira que sejam obtidos os maiores níveis de produtividade econômica. O principal problema da agricultura brasileira é a má utilização dos recursos disponíveis, sendo a água um dos principais. O planejamento dos recursos hídricos, principalmente o uso da irrigação, é uma atividade complexa que exige uma gestão integrada para evitar e administrar conflitos gerados pela intensidade e diversidade do uso da água. (FRIZZONE, 1991)

Segundo CARLESSO, *et alli* (2001), a incorporação e expansão de áreas irrigadas está associada à necessidade de aumento dos níveis de produtividade, já que a expansão horizontal da agricultura está esgotada. Assim, a irrigação é uma tecnologia que agrega valor à produção, gerando maior rentabilidade ao produtor. Acrescenta-se que o interesse por esta técnica tem se dado nas mais diferentes condições climáticas e condições sócio-econômicas dos produtores.

2.2.3. Perdas por falta de água

De acordo com TUBELIS (1988), a produção agrícola é substancialmente afetada pelas condições atmosféricas e que tal influência é

sentida nas fases de plantio, crescimento, frutificação, colheita e até mesmo na conservação e armazenamento dos produtos agrícolas.

Segundo MATZENAUER *et alli* (1998), a disponibilidade hídrica é o principal fator limitante ao crescimento e desenvolvimento da cultura do milho no Rio Grande do Sul.

CUNHA *et alli* (1998) defende que a variabilidade na distribuição de chuvas é a principal limitação à expressão do potencial de rendimento da soja no sul do Brasil no período de primavera-verão. Concluiu em seu trabalho que a limitação hídrica prejudica a produção de soja em escalas regionalmente diferenciadas, sendo as de maior magnitude no sul e oeste do estado. Em 80 % dos anos a perda é menor que 30 % no nordeste e que 55 % no sudoeste.

Segundo HELDWEIN *et alli* (2001), a produção de alimentos está condicionada a fatores ambientais que, em muitos casos, prejudicam o desenvolvimento das plantas, fazendo com que muitas regiões sejam importadoras de alimentos, principalmente nas entressafras, dentre elas o Rio Grande do Sul.

BERLATO & FONTANA (2001) apresentam uma equação quadrática que representa a relação entre a precipitação pluvial e o rendimento da soja no Rio grande do Sul com um coeficiente de determinação próximo de 0,8; o que demonstra a grande influência da água na produção agrícola. Entretanto, a falta d'água não se resume a estes exemplos, atingindo a grande maioria dos cultivos de verão.

2.2.4. Problema da escassez de água

Como já foi observado até aqui, a irrigação é uma ferramenta de suma importância, visto que, devido à falta ou inconstância das precipitações, esta vem a incrementar a produção de alimentos e gerar maior renda aos produtores e demais elos da cadeia do agronegócio. Assim, parece que bastaria “jogar” água sobre as lavouras e os problemas de produção e renda

estariam resolvidos. No entanto, devido à conjuntura econômica e ao aumento populacional, que leva a uma menor disponibilidade de recursos hídricos, há que se primar pelo uso racional da água.

Segundo Brasil (1999), o fato da demanda mundial por água de boa qualidade crescer a uma taxa superior a da renovabilidade do ciclo hidrológico é consenso no meio técnico e científico. Este incremento deve ser uma das maiores pressões sobre os recursos naturais no próximo século. Comentam também que o consumo mundial de água aumentou mais de seis vezes entre 1900 e 1995, o que significa um aumento superior ao dobro da taxa de crescimento da população, e tende a continuar.

Neste sentido, ZANARDI JÚNIOR (2001) relata que a escassez de água tanto em termos qualitativos como quantitativos tornou-se fato incontestável e que a lei 10350 de 30 de dezembro de 1994 resultou da necessidade de adotar regras para disciplinar o uso da água devido aos constantes conflitos pela utilização desta.

2.2.5. Política de irrigação no Brasil

No ano de 1988, o governo brasileiro empreendeu uma análise no setor de irrigação e preparou um relatório chamado “Resenha Setorial da Irrigação no Brasil” , cujo conteúdo estava sendo cogitado para ser a política oficial de irrigação no país. Portanto, os futuros projetos deveriam estar de acordo com esta resenha. Algumas das conclusões deste trabalho, dentre outras, são de que no Brasil deve-se dar mais ênfase ao desenvolvimento da irrigação do que à expansão de novas áreas, no intuito de eliminar as deficiências nacionais na produção de grãos, frutas e verduras. Deve-se dar ênfase ao desenvolvimento da irrigação privada e o governo deve prover crédito, assistência técnica, infraestrutura, **pesquisa na área**, etc. . (BRASIL, 1993)

2.3. Manejo da irrigação

Na maioria das vezes a irrigação é feita baseada no senso prático dos irrigantes, por meios inadequados (LOPES FILHO, 2000).

AMORIN NETO (1981) comenta que para uma condução de projetos racionais, é necessário determinar a quantidade e a frequência de aplicação de água.

EVANGELISTA (1999) afirma que o conhecimento do momento correto da aplicação da irrigação e da quantidade requerida por uma cultura é de grande importância para um manejo adequado da irrigação, dotando o solo de água facilmente disponível, com mínimo consumo de energia. Assim, evita-se aplicações excessivas ou deficientes que podem acarretar doença, lixiviação de nutrientes, perdas de solo e gasto adicional de energia e insumos.

As duas perguntas mais importantes no que diz respeito à irrigação: quando irrigar? e quanto irrigar? são comentadas por REICHARDT (1990). Segundo o autor, a água deve ser aplicada quando o potencial ainda está suficientemente alto a ponto de não expor a planta a uma carência que afete o seu desenvolvimento e para que o solo tenha uma condutividade hidráulica, capaz de atender à demanda atmosférica. Afirma que a maioria das plantas tem seu desempenho afetado quando o potencial matricial atinge valores menores que -5 atm e recomenda que não se deva deixar que estes valores atinjam -3 atm. Estes são, no entanto, números genéricos e cada cultura tem suas especificidades. O autor recomenda que a tensão de água no solo seja avaliada, no mínimo em duas profundidades diferentes, na zona de máxima atividade radicular e no seu limite inferior. A primeira deve ser utilizada para estabelecer a época de irrigação e a segunda para se ter um controle do movimento da água no solo.

Uma das formas de estabelecer quanto aplicar é por meio do balanço hídrico do solo, onde o consumo de água é calculado a partir da evapotranspiração, calculada por um dos métodos para a estimativa da evapotranspiração de referência. Assim, soma-se as chuvas e subtrai-se as

evapotranspirações. Quando chegar o momento de irrigar, adiciona-se um valor igual à deficiência apresentada. O autor dá como sugestão o uso de tanque de evaporação para determinar esta deficiência.

Em acordo com estas recomendações, CHIEPPE *et alli* (2000) pesquisaram a influência de três métodos de controle de irrigação e três tensões de água no solo. No primeiro método, utilizaram-se dois tensiômetros, a 15 e a 30 cm, servindo o primeiro para indicar o momento e o segundo o quanto irrigar. No segundo método fez-se uso do tanque classe "A" para determinar o momento da irrigação quando a evapotranspiração atingisse a lâmina pré-fixada de acordo com a tensão estabelecida. No terceiro, irrigava-se quando a tensão, medida por tensiômetro, como no primeiro método, atingia o valor pré-estabelecido pelo tratamento, sendo a lâmina aplicada igual a evapotranspiração calculada com o tanque. As tensões foram de 30 e 60 Kpa para todo o período e 60 KPa na fase vegetativa e 30 KPa na reprodutiva. Concluíram que os tratamentos não afetaram o desenvolvimento da planta.

DALMAGO *et alli* (2001) testou 3 métodos de determinação da evapotranspiração de cultura utilizando tensiômetros, sonda de nêutrons e lisímetros com dados diários e quinqüidiais. Concluíram que, para cinco dias, os métodos forneceram resultados similares, e, para um dia, pode-se determinar adequadamente os valores através dos lisímetros de drenagem em casa de vegetação.

2.3.1. Técnicas de controle da irrigação

Segundo FRIZZONE (1991), as técnicas de controle de irrigação podem ser classificadas baseadas em:

- atributos físicos e hídricos do solo (teor e tensão de água no solo);
- fisiologia das plantas;
- balanço hídrico na zona radicular e;
- através da ajuda de modelos micrometeorológicos.

2.3.1.1. Controle de irrigação através de atributos físicos e hídricos do solo

Segundo BERNARDO (1989), os métodos de determinação de água no solo são divididos em gravimétricos, eletrométricos e tensiométricos. Os primeiros, apesar de serem os mais precisos, demandam muita mão-de-obra, necessitando de amostragens periódicas no campo, e equipamentos como balança de boa precisão e estufa. Os dois últimos, na verdade, medem a tensão da água retida no solo, porém, de formas diferentes. Dentro dos eletrométricos, o aparelho de Bouyoucos possui uma cápsula de gesso que se mantém em equilíbrio com a tensão da água do solo, variando a resistência elétrica entre dois eletrodos. O aparelho de Colman possui o mesmo princípio, porém usa cápsula de fibra de vidro e o aparelho também mede a temperatura para realizar a correção do valor de tensão.

Os tensiômetros são tubos que contém água no interior, com uma cápsula porosa numa das extremidades e a outra ligada a um manômetro, que indica diretamente a tensão no solo. Este tipo de aparelho tem as desvantagens de medir tensões pontuais, que podem variar com as características do solo, e não medir tensões abaixo de -1 atm. (REICHARDT, 1990). Outra desvantagem é a fácil avaria ou perda destes no campo.

Há também os aparelhos de TDR's, raios gama e sonda de nêutrons. Porém, são equipamentos extremamente caros, sendo que os últimos podem causar danos à saúde se usados de forma inadequada. DALMAGO *et alli* (2001) comenta que o armazenamento de água mais significativo ocorre nas camadas superficiais do solo, onde a sonda de nêutrons não pode ser usada.

2.3.1.2. Controle de irrigação através de características fisiológicas das plantas

As técnicas baseadas na fisiologia das plantas, segundo BERNARDO (1989), usam sintomas característicos de falta de água, mas quando estes são visíveis, já houve o dano à produção. O autor reclama a necessidade de pesquisa sobre plantas indicadoras que apresentariam tais sintomas sob tensões menores que a cultura econômica.

2.3.1.3. Controle de irrigação através do balanço hídrico na zona radicular

FONTANA (1992) apresenta a equação do balanço hídrico, que baseia-se no princípio da conservação de massa, dada pela equação :

$$PP + I - ET - q \pm D \pm \Delta A = 0 \quad (2)$$

onde PP é a precipitação, I a irrigação, ET a evapotranspiração, q o escoamento superficial, D a drenagem profunda e ΔA a variação no armazenamento do solo.

Este método, porém, necessita da medição ou estimativa de vários parâmetros, que geralmente não se faz em culturas comerciais, como por exemplo a drenagem profunda ou o escoamento superficial, limitando-se este método a experimentos.

2.3.1.4. Controle de irrigação através de modelos micrometeorológicos

As técnicas de controle de irrigação, que utilizam modelos micrometeorológicos, baseiam-se na estimativa da evapotranspiração de referência. Segundo PEREIRA *et alli* (1997), estes métodos podem ser classificados como empíricos, aerodinâmicos, por balanço de energia, combinados ou correlação dos turbilhões. Dentro dos empíricos incluem-se os

métodos do tanque classe “A”, de Thornthwaite, Camargo, Makkink, da radiação solar, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani e Blaney-Cridde. O método aerodinâmico, também conhecido como Thornthwaite-Holzman, tem embasamento físico-teórico na dinâmica de fluidos e transporte turbulento. Os métodos baseados no balanço de energia são os da razão de Bowen e Priestley-Taylor. Os métodos combinados são basicamente a equação de Penman, que foi modificada por vários autores ao longo do tempo no intuito de fazê-la mais precisa e fisicamente correta. Esta evolução é discutida adiante. O método da correlação dos turbilhões baseia-se no princípio de que a interação da atmosfera com a superfície gera turbilhões e que estes causam o fluxo das propriedades atmosféricas, inclusive o vapor d'água.

2.3.1.4.1. Equação de Penman

A equação de Penman combina o balanço de energia na superfície com um termo aerodinâmico. O método de Penman é considerado por muitos como padrão, sendo os demais combinados aproximações e extensões deste. Porém, isso não significa que seja operacionalmente perfeito, mas que é baseado em princípios físicos corretos (SEDIYAMA, 1996). Segundo FARIAS *et alli* (1994), a equação de Penman (1948) pode ser expressa da seguinte forma :

$$ET_o = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{Q^*}{59} + Ea}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}} \quad (3)$$

onde Δ é a tangente à curva de saturação para a temperatura do ar dada pela equação 4, Q^* é o balanço de energia ou saldo de radiação, γ é a constante psicrométrica e Ea é o fator aerodinâmico dado pela equação 5.

$$\Delta = 33,8639 \cdot \left[0,05904 \cdot (0,00738 \cdot t + 0,8072)^7 + 3,42 \cdot 10^{-5} \right] \quad (4)$$

$$Ea = 0,35 \cdot (e_s - e) \cdot (0,5 + 0,01 \cdot u_2) \quad (5)$$

onde t é a temperatura média do ar e u_2 é a velocidade do vento a 2m de altura.

Monteith, em 1965, sobre a teoria da “grande folha”, acrescentou a resistência do dossel à difusão do vapor d’água (r_c) que determina a transpiração média e a resistência do ar ao transporte de calor sensível e vapor (r_a). Porém, r_a e r_c são de difícil medida, ficando restrito a pesquisas para a compreensão dos processos físicos e biológicos da evapotranspiração.

Baseados nas modificações de Monteith e parametrizações de acordo com a definição de ETo da FAO, a equação que passou a ser considerada padrão foi denominada de Penman-Monteith FAO, ficando:

$$ET_o = \frac{\Delta \cdot (Q^* - G)}{(\Delta + \gamma^*) \cdot L} + \frac{900 \cdot \gamma \cdot u_2 \cdot (e_s - e)}{(\Delta + \gamma^*) \cdot (t + 275)} \quad (6)$$

2.3.1.4.2. Método do tanque classe “A”

INSERIR COMENTÁRIOS SOBRE O HISTÓRICO DO TCA

Segundo EVANGELISTA (1999), a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) propõe cinco métodos para a estimativa da evapotranspiração que são: Penman-Monteith, Penman Modificado, Blaney-Criddle, da Radiação e a do tanque classe “A”.

Segundo PEREIRA *et alli* (1997), o método do tanque classe “A” é muito utilizado no manejo de sistemas de irrigação.

Segundo IRMAK *et alli* (2002), tanque classe “A” é usado extensivamente pelo mundo para medir evaporação e estimativas de evapotranspiração de referência.

Este método é freqüentemente utilizado, pois seus dados são largamente disponíveis e com períodos de coleta superiores às recentes estimativas micrometeorológicas (GRISMER *et alli*, 2002).

GALVAMI *apud* LOPES FILHO (2000) afirma que o tanque classe “A” integra as ações do vento, da radiação solar, da umidade do ar, da temperatura e insolação.

Constituição e características do tanque classe “A”

O tanque Classe “A” consiste de um tanque de forma circular com diâmetro de 121 cm, profundidade de 25,4 cm, sendo que o nível da água deve ficar a 5 cm da borda superior no nível máximo. O nível da água não pode variar mais que 2,5 cm, isto é, no nível mínimo a lâmina de água deve ficar a 7,5 da borda. Feito com chapa nº 22 de ferro galvanizado ou aço inoxidável, é instalado sobre estrado de madeira pintado de branco a 15 cm do solo, como mostra a Figura 2 (LOPES FILHO, 2000; BERNARDO, 1989; REICHARDT, 1990).

As medições de nível são geralmente feitas em poço tranquilizador dentro do tanque, através de um micrômetro de gancho, porém, para fins de irrigação, este pode ser instalado pelo lado de fora e a leitura ser feita através de uma régua graduada (BERNARDO, 1989).

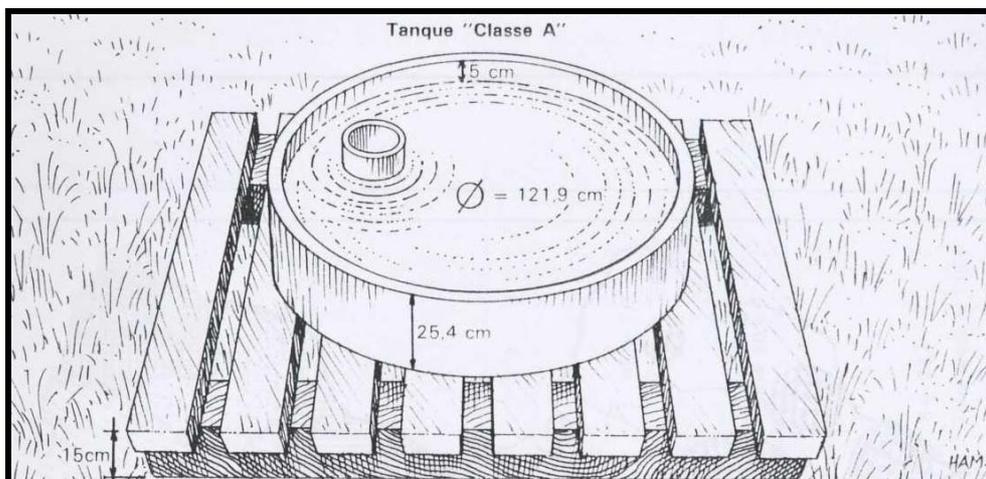


Figura 2. Ilustração das dimensões do tanque classe "A". Extraída de : Tempo de irrigar: Manual do irrigante – PRONI.

O nível mínimo recomendado para a operação do tanque é de 20 cm, pois o volume de água se torna muito pequeno aquecendo excessivamente, o que leva a um erro de medida. Caso chova, o tanque funciona como um pluviômetro, subindo o nível, porém este dado não é confiável, já que a bordadura é pequena, e, devido ao vento, há perda de água (REICHARDT, 1990).

Coeficiente de tanque

O método de determinação do ET_o consiste em um procedimento simples onde se determina a evaporação do tanque (Et_{ca}) por meio da diferença entre duas leituras diárias e depois multiplica-se o resultado por um coeficiente de tanque (K_p), ficando :

$$ET_o = K_p \cdot Et_{ca} \quad (7)$$

Como já referido anteriormente, para calcular a ET_c é preciso que se inclua no cálculo o coeficiente de cultura. Portanto, esta é calculada acrescentando-se o K_c na equação 9, ficando :

$$ETc = Kc \cdot Kp \cdot Etca \quad (8)$$

Segundo PEREIRA *et alli* (1997), visando permitir a interpolação de dados e a utilização de sistemas automatizados, pode-se usar equações como a de SNYDER (1992) para determinar o Kp. Esta equação pode ser descrita como :

$$Kp = 0,482 + 0,024 \cdot \ln B - 0,000376 \cdot u_{10} + 0,0045 \cdot URA \quad (9)$$

O coeficiente Kp é função do tamanho da bordadura, da média diária da velocidade do vento e da umidade relativa do ar. Este coeficiente, de acordo com a tabela de DOORENBOS & PRUITT (1977), é inversamente proporcional à velocidade do vento a 10 m (u_{10}) e diretamente proporcional ao tamanho da bordadura (B) e da umidade relativa do ar (URA).

Segundo IRMAK *et alli* (2002), para evitar o processo de “busca em tabela” nos programas computacionais, FREVERT *et alli* (1983), desenvolveu uma equação polinomial para Kp. No entanto, SNYDER (1992), considerando a equação de FREVERT complexa e que, sob certas condições, apresentava resultados diferentes dos publicados por DOORENBOS & PRUITT (1977), propôs uma equação mais simples. Os autores, porém, alertam que em seu trabalho SNYDER recomendou o uso de sua equação sem basear-se em testes de desempenho. Como conclusão do trabalho, tem-se que a equação de FREVERT obteve melhor desempenho, em comparação à equação de Penman-Monteith, e que a de SNYDER superestimou os valores, principalmente nos meses de verão.

Segundo GRISMER *et alli* (2002), quando DOORENBOS & PRUITT em 1977, publicaram pela FAO-24 os valores de Kp obtidos a partir dos dados de lisímetros em Davis, Califórnia, modificaram os seus dados originais. Baseados na experiência a respeito da precisão dos seus dados para estimar a ETo, estratificaram os valores individuais da tabela original. Neste trabalho, é

comparada a capacidade dos métodos de: CUENCA (1989), ALLEN & PRUITT (1991), SNYDER (1992), ORANG (1998) e RAGHUWANSHI & WALLENDER (1998), em estimar os valores da tabela original, comparando-os com a capacidade da tabela publicada pela FAO-24. Os resultados mostraram que com exceção da equação de CUENCA (1989), todas as demais estimaram os valores de K_p com precisão similar ao padrão estipulado. Os autores referem, porém, que, usando dados do CIMIS (“Califórnia Irrigation Management and Information System”), o desempenho relativo das equações variou, dependendo do local, o que não tem relação com a capacidade de estimar os valores tabelados.

Segundo CHIN & ZHAO (1995), há consenso entre os hidrólogos que o método de Penman-Monteith fornece a melhor descrição dos processos, tanto da evaporação como da evapotranspiração em um só passo. Hoje em dia, entretanto, são mais disponíveis os dados de coeficientes de cultura do que os fatores de resistência exigidos pelo método de Penman-Monteith. Assim, o método do tanque classe “A”, apesar de usar dois passos para se chegar à medida da evapotranspiração de referência, torna-se muito mais prático. O autor refere, ainda, que na maioria dos estudos as estimativas baseadas no tanque classe “A” estão consistentemente no topo, ou próximo dele, nas listas de desempenho.

MATZENAUER *et alli* (1998), analisando os dados dos métodos de evaporação do tanque classe “A”, radiação solar global e Penman, tendo como base evapotranspirômetros de drenagem tipo Thornthwaite-Mather, afirmam que a evapotranspiração de cultura para os diferentes anos e localidades do estado do Rio Grande do Sul pode ser estimada a partir dos coeficientes apresentados em seu trabalho, pois estes foram oriundos de médias de um período agrícola relativamente longo, sendo assim representativos e consistentes. Os valores de K_c médio diário, para todo o ciclo da cultura do milho, usando o tanque classe “A”, foram de 0,66; 0,72 e 0,68 respectivamente para as épocas de semeadura de setembro, outubro e novembro.

CURY & VILA NOVA *apud* TURCO *et alli* (2000) relatam que para a estimativa da ETo em Botucatu – SP, dentre vários métodos, o do tanque classe “A” e o da radiação solar mostraram os resultados mais consistentes. Os autores citam, ainda, **IGREJA (1987)**, que não encontrou diferença estatística entre medidas feitas em lisímetros e estimativas feitas através do tanque classe “A” .

PERES & SCARDUA (1991) compararam as estimativas de ETo do método de Penman, tanque classe “A” e Thornthwaite através de comparações múltiplas, e concluíram não haver diferença significativa em nível de 5% de probabilidade de erro entre os métodos de Penman e do tanque para dados decendiais.

FARIAS *et alli* (1994) citam os autores **VESCAMBRE & VAYSSE**, que desaconselham o uso de tanque classe “A”, e **MONTENEGRO *et alli* e PRADOS**, que recomendam-no.

AMORIM NETO (1981) cita inúmeros trabalhos sobre o tanque classe “A”, dentre eles o de **FUCHS *et alli***, em que, comparando a perda d’água por métodos gravimétricos e do tanque em cultura de algodão, obtiveram resultado similares, mas afirmam que os equipamentos e trabalho necessários para o gravimétrico foram dez vezes maiores. Outro trabalho interessante é o de **STANHILL (1958)**, em que desenvolveu um equipamento integrador de evaporação e precipitação, constituindo-se de um evaporímetro, um reservatório e um pluviômetro, acoplados de forma que a quantidade de água no equipamento correspondia à quantidade de água retida no solo. O equipamento foi utilizado como indicador de irrigação, demonstrando ser tão preciso como qualquer outro método e tendo a vantagem de dar a indicação direta do déficit de umidade do solo.

SORIANO & PEREIRA (1993) testaram vários métodos de estimativa da ETo para a sub-região da Nhecolândia, Pantanal Mato-grossense com dados médios mensais. Utilizaram o tanque classe “A” como padrão e concluíram que os métodos menos indicados foram o de Penman, Camargo e Thornthwaite. Portanto, tomando-se o caminho inverso, como a grande maioria dos outros

autores, tomando o método de Penman como padrão, conclui-se que o tanque classe “A” teve um desempenho sofrível.

MACHADO & MATTOS (2000) relatam que o método do tanque classe “A” e do tanque 20m² tiveram uma grande dispersão em relação à reta 1:1, não apresentando um desempenho satisfatório em nível quinqüidial. Mas para um período de 10 dias o tanque classe “A” obteve uma melhora significativa na sua precisão, passando o índice r^2 de 0,7 para 0,93, superando até mesmo o método de Penman. No entanto, a exatidão, representada pelo índice “d” de Willmontt, subiu de apenas 0,63 para 0,65; ficando a reta de regressão mais afastada da 1:1, superestimando os resultados.

ALMEIDA *et alli* (1999), num experimento em Ilhéus, Bahia, não recomendam o tanque classe “A” para estimativas diárias apresentando r^2 menor que 0,35. Mesmo para totais semanais ($r^2 > 0,75$) devem ser evitados, pois este superestima em cerca de 11% em relação à Penman-Monteith, segundo os autores.

MEDEIROS (1998), testando vários métodos para a região de Santa Maria – RS com dados de quinqüídios, e tendo como base evapotranspirômetros do tipo Thornthwaite-Mather, classificou o método do tanque classe “A” como “bom” ($c = 0,71$) pelos critérios do coeficiente c de CAMARGO & SENTELHAS (1997), ficando em décimo lugar dentre os 13 testados.

2.4. Uso de mini-tanques

PEREIRA, *et alli* (1997) relatam que a taxa de evaporação depende da área de exposição do tanque. Citam o trabalho de SLEIGHT com tanques enterrados em que demonstra que a taxa de evaporação diminui exponencialmente com o aumento da área do tanque e que um tanque aproximadamente dez vezes menor que outro evapora 55% mais. Ainda, segundo este autor, a profundidade não afetou a taxa de evaporação, sendo que as profundidades variaram de 8 cm até 1,75 m, o que contradiz o que

relata REICHARDT (1990), citado anteriormente. Outra observação foi de que o tanque classe “A” teve a mesma evaporação do tanque de 30 cm enterrado.

LOPES FILHO (2000), em seu trabalho, propôs a utilização de tanques de tamanho reduzido em substituição ao classe “A”, pois, para ele, o custo do segundo é relativamente elevado e ocupa um espaço considerável dentro de casas de vegetação. Os custos tanque-estrado foram de R\$ 1400,00; R\$ 700,00; R\$ 380,00 e R\$ 35,00 para o tanque classe “A” construído com chapas de aço inoxidável, ferro galvanizado, mini-tanque metálico e mini-tanque plástico, respectivamente. O autor relata que o mini-tanque metálico superestimou levemente o tanque classe “A”, pois em tanques menores o ganho de energia advindo da transferência de calor acumulada nas paredes é mais rápida e homogênea. Este equipamento superestimou, em média, 13,82% o classe “A” sendo que, no mini-tanque plástico, o resultado foi mais semelhante ao tanque classe “A”. Segundo o autor, provavelmente a menor superfície do mini-tanque, que levaria a uma maior evaporação, foi compensada pelo fato das paredes de plástico armazenarem menos energia calorífica a ser transferida à massa de água. A superestimativa proporcionada pelo mini-tanque plástico foi de 6,6 %. O autor conclui que o tanque classe “A” pode ser substituído pelos mini-tanques com a vantagem de ter menor custo, ocupar menos espaço e de ser de fácil operação.

HELDWEIN *et alli* (2001), em Santa Maria – RS, utilizou mini-tanques construídos a partir de galões metálicos cilíndricos com capacidade de 20 litros, pintados com zarcão e tinta esmalte branca na parte externa. Fazia-se a leitura com uma régua fixada no interior do tanque diariamente. Dentro das estufas, a lâmina de água dos mini-tanques foi posta a 1,7 m do solo para evitar o sombreamento pelas plantas. Na estação meteorológica, foram postos no chão sobre uma tábua de dimensão igual ao diâmetro. Quando comparados os dados dos mini-tanques da estação com os da estufa, obteve-se um coeficiente de determinação baixo, de 0,514.

SANTOS & KLAR (2001) utilizaram microevaporímetros para avaliar a distribuição espacial da evaporação dentro de uma estufa plástica e compará-

los com os valores de tanque classe “A” em Botucatu – SP. Os microevaporímetros constituíam-se de vasilhames plásticos transparentes com volume de 1,5 litros, 7 cm de altura e 18 cm de diâmetro. Estes foram dispostos a 50 cm do solo, formando uma grade de 2,5 por 1,6 m. Os valores médios mensais para os períodos de setembro/outubro, outubro/novembro e novembro/dezembro dos microevaporímetros foram respectivamente 60; 52,4 e 52,4 % superiores aos do tanque classe “A”. Porém, os autores lembram que este estava posicionado no centro da estufa, local onde a umidade relativa do ar era maior. Afirmam que, devido à grande facilidade, os evaporímetros vem sendo recomendados por técnicos e pesquisadores, mas alertam que a posição destes na estufa pode influenciar bastante no resultado.

MENEZES Jr. (1999) testou o evaporímetro de Piche e tanques reduzidos, tendo como base o tanque classe “A” dentro e fora da estufa em Pelotas – RS. Constatou que todos os aparelhos instalados no interior da estufa apresentaram boas correlações entre si, destacando-se a entre o tanque classe “A” e o reduzido. Os mini-tanques tinham 25 cm de altura por 20 cm de diâmetro e foram instalados 3 unidades: 2 nas cabeceiras e 1 no centro da estufa. Os dados foram analisados em períodos de um e dez dias e as medidas feitas com um micrômetro de gancho. Os coeficientes de determinação para a relação: tanque classe “A” interno x mini-tanque central, foram 0,8 e 0,82 para um e dez dias, respectivamente. Para a média dos três tanques foi de 0,84 e 0,85; também para um e dez dias. Concluiu também que os tanques situados nas extremidades tiveram maiores evaporações que o do centro, concordando com SANTOS & KLAR (2001).

FARIAS *et alli* (1994) estudaram a evapotranspiração de referência por meio dos métodos do tanque classe “A”, Penman e um mini-tanque com 20 cm de diâmetro interno e 25 cm de altura. O experimento foi realizado em Pelotas – RS, com duração de 107 dias e os dados foram analisados em totais quinqüidiais. Os valores do tanque reduzido foram superiores ao classe “A”, pois a evaporação decresce com o aumento da superfície de água, devido a fatores dinâmicos e às diferenças na transferência de energia entre a água e a

atmosfera. Através das análises de regressão linear simples, observou-se que o método de Penman obteve boa correlação entre seus dados no exterior e no interior da estufa e que as piores correlações foram entre o tanque classe “A” interno e externo. Comparando-se os valores de Penman com os tanques, obteve-se um coeficiente de determinação em torno de 0,59 e 0,48 para o tanque reduzido e classe “A”, respectivamente. Correlacionando-se o classe “A” com o reduzido, obteve-se coeficientes de determinação entre 0,79 e 0,81, o que indica a possibilidade de substituição do classe “A” pelo reduzido, com os benefícios de ocupar menos espaço, maior praticidade, menor custo e contribuir menos com a umidade do ambiente.

2.5. Análise de dados

2.5.1 Considerações sobre erro , desvio ou resíduo.

Quando são utilizadas medidas físicas para definir um objeto, esbarra-se em limitações de instrumentos ou mesmo de ordem prática. Isto ocorre, pois os aparelhos e métodos não são suficientemente perfeitos para determinar os verdadeiros valores. Porém, levando-se em conta que para determinados fins não se necessita tamanha precisão, estabelecem-se critérios para saber se um dado é ou não digno de confiança. Definem-se erros em ensaios ou análises, como desvios em torno do valor real. Considerando-se que o valor real raramente é conhecido, indicam-se como reais certos valores com maior probabilidade de estarem corretos, como por exemplo a média de um grande número de determinações. Estatisticamente, sabe-se que diversas determinações de uma amostra tendem a se dispor em torno de um valor central de forma simétrica, de acordo com a curva de Gauss. Este tipo de erro ocorre principalmente na amostragem e no uso de aparelhos de medida (CAUDURO & DORFMAN, 19__).

O erro absoluto é a diferença entre o valor real, ou tomado como tal (padrão), e o obtido.

$$E_{abs} = Valor_{obtido} - Valor_{real} \quad (10)$$

O erro relativo é a diferença entre o valor obtido e o real, expresso em porcentagem do valor real

$$E_{rel} = \frac{Valor_{obtido} - Valor_{real}}{Valor_{real}} \cdot 100 \quad (11)$$

Porém, estes cálculos são usados para determinar as magnitudes de erros de valores individuais. Para um grande número de dados utiliza-se a estatística do “erro padrão da estimativa” (epe), também chamada de desvio padrão dos resíduos ou raiz do quadrado médio do erro. Este valor calculado dá uma medida da dispersão dos pontos (CAUDURO & DORFMAN, 19__). Segundo GEORGE *et alli* (2002), o epe dá igual peso à diferença absoluta entre o padrão e o testado e que fornece a qualidade do ajuste das duas variáveis. A estatística é dada por :

$$epe = \left[\frac{\sum (Valor_{padrão} - Valor_{estimado})^2}{p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Este parâmetro é apresentado por diferentes autores com diferentes graus de liberdade, em que IRMAK *et alli* (2002) usam “p”, EVANGELISTA (1999) e GEORGE *et alli* (2002) usam “p-1” e finalmente, ALMEIDA *et alli* (1999) e ALLEN *et alli* (1989) usam “p-2”. Segundo (CAUDURO & DORFMAN, 19__), o cálculo é feito com “p” para amostras maiores que 30 ou “p-2” para as menores.

2.5.2. Regressão e Mínimos quadrados

Segundo COSTA NETO (1987), muitas vezes, o diagrama de dispersão sugere a existência de uma relação funcional entre duas variáveis e, que para expressar uma função que exprima esta relação, faz-se uso da regressão. Esta é uma linha que explica grande parte da variação de y em função de x , porém uma parcela permanece sem ser explicada, o que é atribuído ao acaso. Como na maioria dos casos, a variável x pode ser medida com precisão, admite-se x sem erro e y com uma parcela de variação residual, responsável pela dispersão dos pontos. Esta variação em torno da linha teórica de regressão pode ser descrita como um desvio-padrão residual que independe do ponto considerado, com distribuição normal de média zero e desvio-padrão constante. Assim, a aplicação do princípio da verossimilhança leva ao procedimento dos mínimos quadrados, onde minimiza-se a variação residual em torno da reta estimada. Enfim, para calcular os coeficientes da reta $y=a+bx$, pode-se utilizar as seguintes equações:

$$b = \frac{\sum x \cdot y - \left(\frac{\sum x \cdot \sum y}{p} \right)}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{p}} \quad (13)$$

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (14)$$

No entanto, não basta determinar tais coeficientes, mas é preciso testá-los estatisticamente através de testes de hipóteses para saber se estes diferem dos valores tidos como ideais. Segundo COSTA NETO (1987), os parâmetros a e b podem ser testados pelo teste “t” de Student dada por:

$$t_{p-2} = \frac{x - x_0}{\frac{S_R}{\sqrt{S_{xx}}}} \quad (15)$$

onde x representa a ou b estimado através da regressão e x_0 , o valor testado, S_{xx} é o somatório dado pela equação 16 e S_R é a **variância residual, calculada pela equação 17**:

$$S_{xx} = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{p} \quad (16)$$

$$S_R^2 = \frac{S_{yy} - b \cdot S_{xy}}{p - 2} \quad (17)$$

VER COSTA NETO !!!

2.5.3. Precisão e exatidão

CAUDURO & DORFMAN (19__) dão as definições de três conceitos importantes na análise de dados como segue:

A **sensibilidade** de um instrumento é dada pelo menor valor que se pode detectar com precisão.

Exatidão é dada pelo grau de variação na tomada das medidas em torno do valor real ou padrão. Quanto menor a variação maior a exatidão.

Precisão é dada pelo grau de repetibilidade do valor das medidas. Quanto menor a dispersão, maior a precisão.

Estes conceitos podem ser melhor entendidos através da Figura 3.

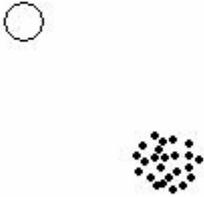
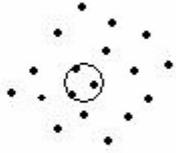
Preciso mas pouco exato	Exato mas pouco preciso
	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> • Valor estimado ○ Valor real </div>	

Figura 3. Definição visual dos conceitos de precisão e exatidão.

Segundo CAMARGO & CENTELHAS (1997), a precisão pode ser dada pelo coeficiente de correlação (r), que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão, que está relacionada com o afastamento dos valores estimados em relação aos observados, é expresso matematicamente pelo índice de concordância de Willmont (d) e que seus valores variam de 1, para concordância perfeita a 0, para nenhuma concordância.

MACHADO & MATTOS (2000) comentam que a comparação dos dados testados em seu trabalho foi feita por meio dos coeficientes de correlação (r) e das análises de regressão linear para estabelecer os níveis de significância pelo teste “t”, traçando-se uma reta teórica de 45° ou reta 1:1. Comenta, também, que quanto menor a dispersão, mais previsível é o modelo, mas que para analisar o desempenho de um método não se deve usar somente o coeficiente r , pois este não leva em consideração o tamanho da diferença entre o padrão e o previsto pelo modelo. Assim, para testar a homogeneidade da dispersão em relação a reta 1:1, empregou o teste de concordância de Willmont (d) expresso pela equação 18.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (\text{Estimado} - \overline{\text{Padrão}})^2}{\sum \left(\left| \text{Estimado} - \overline{\text{Padrão}} \right| + \left| \overline{\text{Padrão}} - \overline{\text{Padrão}} \right| \right)^2} \right] \quad (18)$$

onde $\left| \overline{\text{Padrão}} \right|$ é a média do padrão estipulado.

O coeficiente de correlação (r) pode ser calculado como a razão entre a covariância e o produto dos desvios padrões de x e y , de acordo com a equação 19:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y} \quad (19)$$

onde S_{xy} é a covariância, S_x é o desvio padrão de x e S_y o desvio padrão de y .

COSTA NETO (1987) afirma que, em geral, não se deve estabelecer a reta dos mínimos quadrados quando $|r| < 0,7$, pois nestes casos, o coeficiente de determinação (r^2) seria menor que 0,49, significando que a reta de regressão não consegue explicar nem 50% da variação de Y . No entanto, LOPES FILHO (2000), em seu trabalho com mini-tanques, apresenta a tabela 1, adaptada de outros autores um pouco mais tolerante, considerando-se forte correlações com r superiores a 0,6.

COSTA NETO (1987) afirma que, assim como os coeficientes a e b da regressão, muitas vezes, deve-se saber se um dado valor de r , combinado com o respectivo tamanho da amostra (n), permite concluir a um dado nível de significância, que realmente existe correlação linear entre duas variáveis. Para isso, testa-se a hipótese nula $H_0 : r = 0$ (zero), pela estatística abaixo, com “p-2” graus de liberdade, em que, se rejeitada a hipótese acima, pode-se concluir pela existência de correlação.

$$t_{p-2} = r \cdot \sqrt{\frac{p-2}{1-r^2}} \quad (20)$$

Tabela 1. Valores de $|r|$ e sua interpretação segundo LOPES FILHO (2000), adaptada de Crespo (1993) Francisco (1982).

Valores de $ r $	Interpretação
0,6 - 1,0	Correlação forte entre as variáveis. É possível tirar conclusões sobre o comportamento simultâneo das mesmas.
0,3 - 0,6	Há uma correlação fraca entre as variáveis em análise.
0,0 - 0,3	Correlação muito fraca. Nada se pode concluir sobre as variáveis em estudo.

CAMARGO & CENTELHAS (1997) propuseram em seu trabalho um novo índice denominado de índice de desempenho representado pela letra “c”, unindo os conceitos de precisão com a exatidão. Este valor é, portanto, o resultado da multiplicação dos coeficientes que representam estes conceitos da seguinte forma:

$$c = r \cdot d \quad (21)$$

Os autores propuseram, também, uma classificação para interpretação dos resultados de “c” os quais são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2. Critério de interpretação do desempenho de métodos de estimativa da ETP, pelo índice “c”.

Valores de c	desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito Bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,60	Sofrível
0,41 - 0,50	Mau
< 0,41	Péssimo

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local do experimento

O experimento foi realizado na Estação Agrometeorológica, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria – RS.

A estação tem as coordenadas de 29°41" de latitude sul, 53°42" de longitude oeste e altitude de 95 m, aproximadamente. Segundo MORENO (1961) *apud* MEDEIROS (1998), o clima da região, classificado, pelo método de Köppen, é "Cfa" o que corresponde a um clima sub-tropical chuvoso, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, e não existem estações secas e úmidas bem definidas, com no mínimo 4 meses com temperatura menor que 10 °C e temperatura do mês mais quente maior que 22 °C.

Os dados utilizados constam de observações diárias, coletadas nas estações Climatológicas Principal e Agrometeorológica, de evaporação do tanque classe "A", precipitação, insolação, temperaturas às 9, 15 e 21 horas, temperatura máxima e mínima diária, umidade relativa do ar às 9, 15 e 21 horas, vento a 2 e 10 metros de altura, insolação além das medidas nos mini-tanques.

3.2. Material e construção dos mini-tanques

Os mini-tanques, doravante serão denominados de tanque "SM" ou simplesmente "tsm", por razões de simplificação. Estes foram construídos com materiais de PVC e as peças necessárias para sua construção estão listadas na tabela 3.

Os mini-tanques constituem de uma cuba feita com um "tampão" ou CAP de 200 mm. Este é perfurado no centro, onde é fixado um pedaço de cano de ½ polegada com um adaptador de anel. A este adaptador encaixa-se outro, para mangueiras flexíveis. A mangueira flexível, por sua vez, liga este a outro

adaptador fixado com massa epoxi a um CAP de 100 mm, que serve como tampa do reservatório para as águas de chuva excedente. Tal reservatório constitui-se de uma barra de aproximadamente 50 cm de cano 100 mm, com outro CAP colado na extremidade que serve de base. As medidas de nível da água no tanque são feitas através de um piezômetro feito com o corpo de acrílico de uma caneta esferográfica, ligada à cuba por meio de uma mangueira de aproximadamente 2 mm de diâmetro. Ao lado do piezômetro, existe uma régua de acrílico colada na parede externa do tanque com escala em milímetros. O tanque “SM” é fixado através de atilhos de arame a um suporte feito de ripas de madeira de 2x2 cm, pintado com tinta branca, com sua base a uma altura de 80 cm do solo. Maiores detalhes podem ser observados nas figuras 4 a 7.

Tabela 3. Lista de materiais necessários à construção do tanque e respectivos custos.

Material para a construção do tanque				
Item	Unidades	Valor unitário (R\$)	Quantidade	Valor Total (R\$)
CAP 200 mm	unidade	40.00	1	40.00
Cano 100 mm	1 m	5.00	50 cm	2.50
Cano ½” pol.	1 m	1.10	15 cm	0.17
Mangueira ½”	1 m	1.30	30 cm	0.39
Régua de acrílico	unidade	0.70	1	0.70
Cola plástica	tubo	2.40	10 % do tubo	0.24
Massa epoxi	caixa	2.85	1	0.71
Adaptador de anel ½”	unidade	4.75	1	4.75
Adaptador para mangueira ½”	unidade	0.50	2	1.00
CAP 100 mm	unidade	3.80	2	7.60
Piezômetro	unidade	0.30	1 caneta	0.30
Mangueirade 2 mm	1 m	1.50	2 cm	0.03
Mangueira de 5 mm	1 m	2.00	8 cm	0.16
Ripas 2x2 cm	unidade	4.00	5 m	4.00
Fita veda-rosca	unidade	1.50	2% do rolo	0.02
Fita isolante	5 m	2.00	2% do rolo	0.04
Arame de atilho	1 Kg	6.70	10 g	0.07
Tinta óleo branca	1 litro	10.00	250 ml	2.50
Total (R\$)				65.17

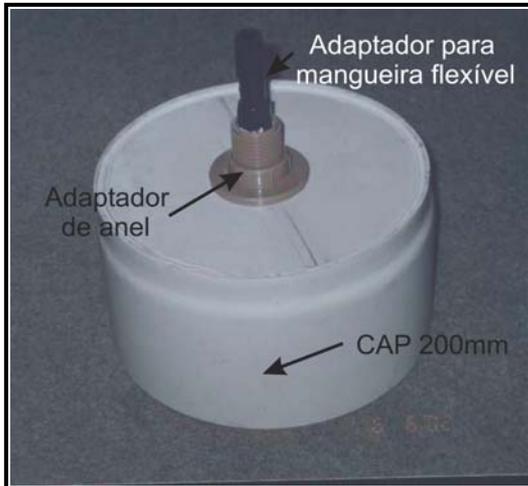


Figura 4. Vista da parte inferior do tanque.

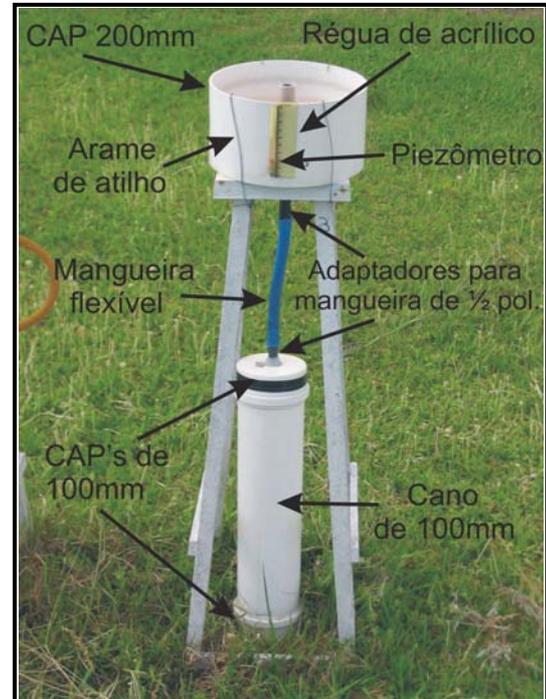


Figura 5. Vista geral do tanque.



Figura 6. Suporte para o tanque.

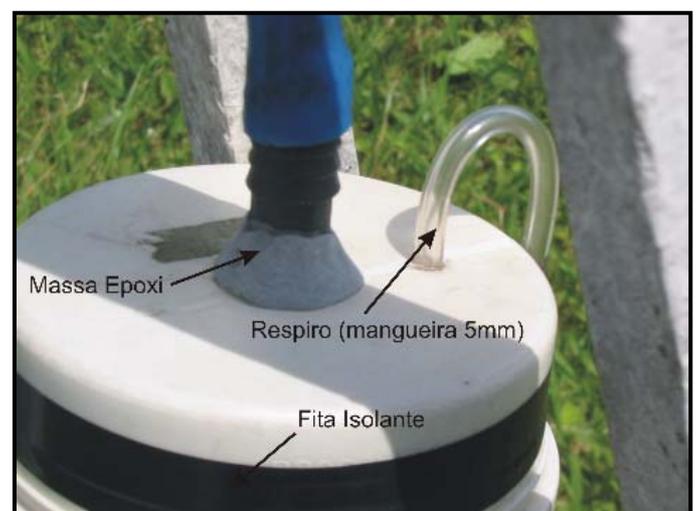


Figura 7. Detalhe da tampa do reservatório.

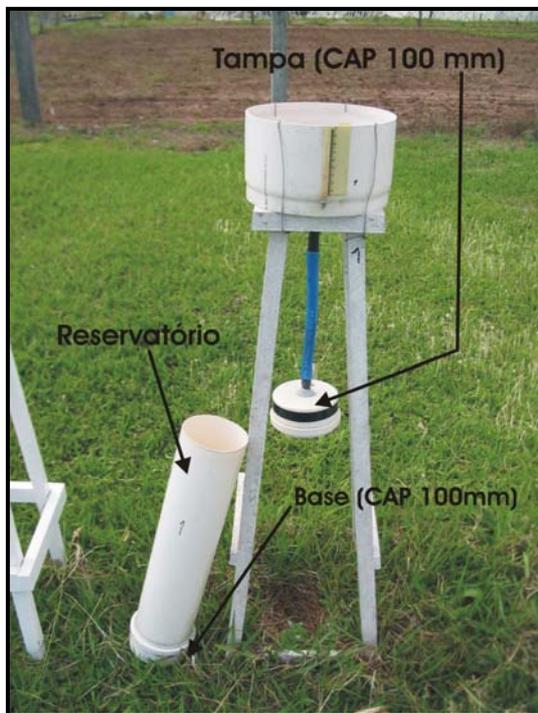


Figura 8. Detalhe do reservatório.

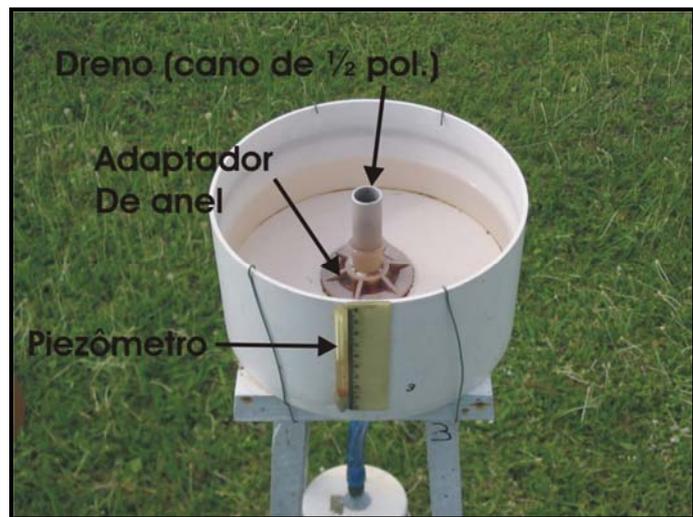


Figura 9. Cuba feita com CAP de 200 mm.

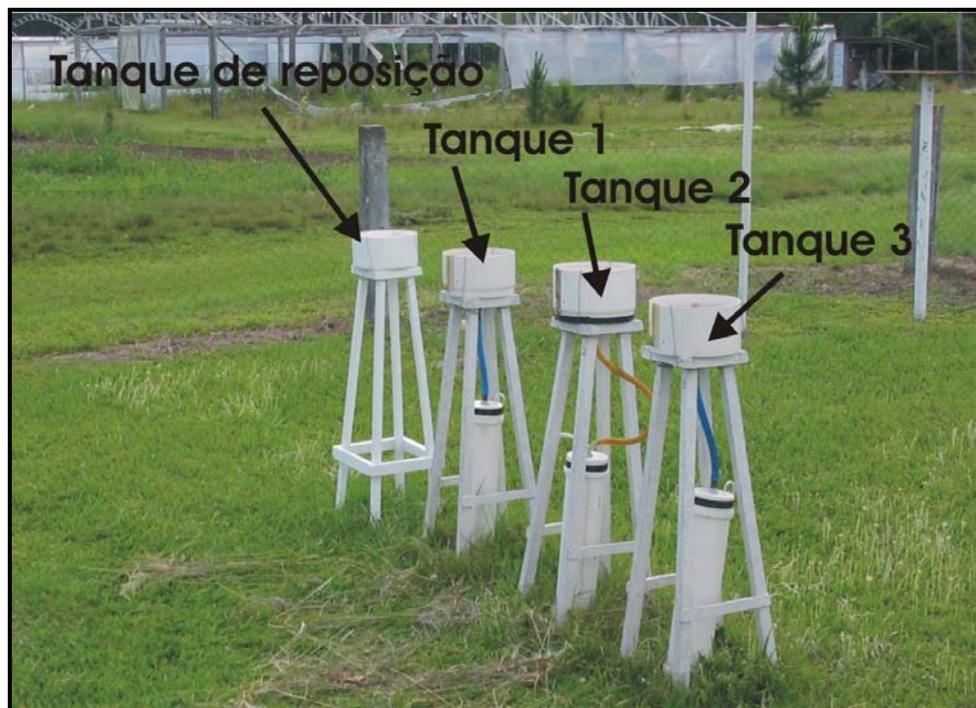


Figura 10. Vista geral dos tanques.

3.3. Fases do trabalho

O trabalho consta de três fases, em seqüência, onde mudanças foram feitas durante sua evolução, com a intenção de melhorar as estimativas feitas através deste novo evaporímetro. As leituras de nível eram feitas diretamente no piezômetro e a água acumulada no reservatório, medida com uma proveta.

Na primeira fase, utilizou-se somente um tanque, denominado n° 2, no qual foi posto água até a marca de 290 mm de sua escala, o que corresponde a 1,7 cm abaixo da borda. O nível do dreno correspondia a este mesmo nível, ou seja, teoricamente não havia espaço para elevação. O tanque foi posto a 50 cm do solo sobre um suporte de metal. As leituras eram feitas diariamente às 9h da manhã. O período de coleta de dados foi de 20/07/2001 a 05/11/2001.

Na segunda fase, de 08/07/2002 a 20/12/2002, foram postos mais dois tanques a uma altura de 80 cm do solo sobre os suportes de madeira. Esta mudança foi feita para facilitar a leitura, pois a 50 cm o tanque “SM” ficava muito baixo, o que causava desconforto na hora da leitura e aumentava a probabilidade de erro, já que o observador não tinha uma referência de nível fixa. A 80 cm do solo a água, no piezômetro, fica aproximadamente no mesmo nível dos olhos de um observador agachado, o que melhora a referência de nível, pois este fica mais próximo do menisco e mais confortável. Os níveis da água nos tanques correspondiam a 190, 280 e 180 mm das suas escalas, respectivamente, para os tanques 1, 2 e 3. Estes níveis correspondiam a 1,2; 2,7 e 2,4 cm abaixo da borda e seus drenos ficavam a 0,6; 2,1 e 0,6 cm também da borda.

Por dificuldades operacionais passou-se a fazer as leituras às 12 h, apesar de não ser o melhor procedimento. Acredita-se porém, que a diferença de três horas nos horários de leituras não chegue a causar grande diferença nas lâminas evaporadas, pois o intervalo entre as leituras continuou a ser de vinte e quatro horas. Acredita-se também, que a estimativa da chuva pode ter sido prejudicada, pois sendo este um fenômeno de intensidade e variabilidade

temporal muito superior à evaporação, a diferença de três horas, provavelmente foi bem mais significativa neste caso.

Na terceira fase, de 29/06/2003 a 30/11/2003, os níveis da água foram alterados, em suas escalas, para 160, 255 e 180 mm para os tanques 1, 2 e 3, respectivamente. Além disso, reduziu-se a altura do dreno em relação à borda no tanque 1 de 0,6 cm para 4 cm com a intenção de reduzir a perda de água da chuva e melhorar suas estimativas.

Estas mudanças podem ser melhor observadas na tabela 4 e figura 11 abaixo, em que h_1 é a altura da borda do tanque em relação ao nível da água, h_3 é a altura do dreno em relação à borda e h_2 é a altura do dreno em relação ao nível da água, D_1 é o diâmetro do tanque e D_2 o do dreno, que são 200 mm e $\frac{1}{2}$ polegadas, respectivamente.

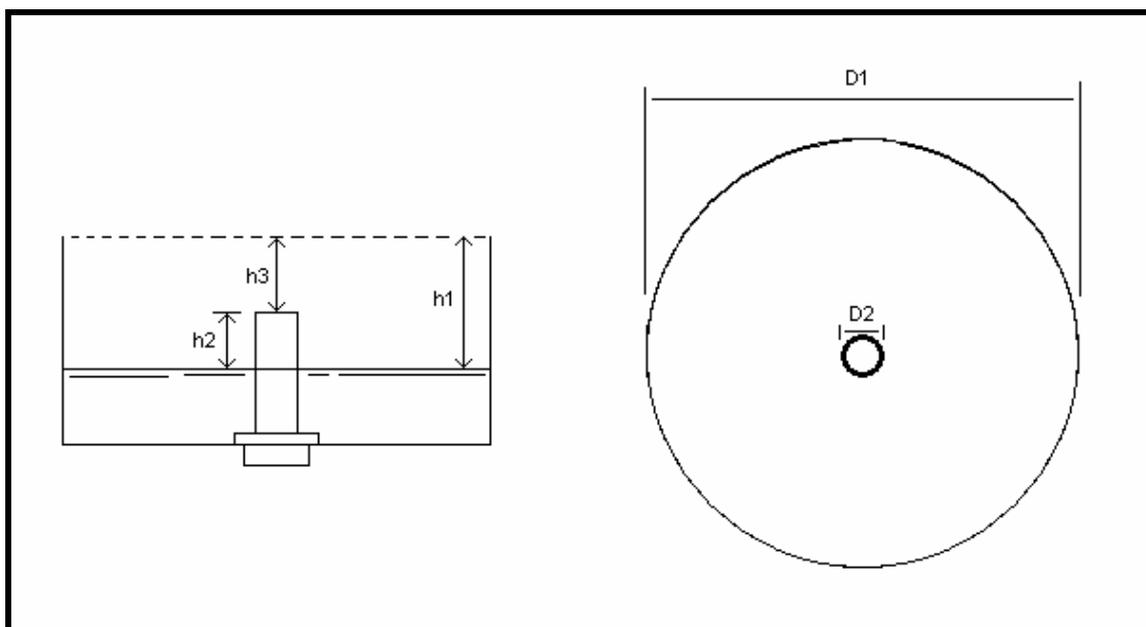


Figura 11. Alturas características, relativas do nível da água e do dreno em relação à borda e os diâmetros da cuba e do dreno. Corte transversal à esquerda e vista superior à direita.

Tabela 4. Fases do trabalho e respectivos níveis da água (h1) e dreno (h3) em relação à borda e a diferença de nível entre o dreno e a água (h2), expressos em cm.

Fases do trabalho							
	I	II			III		
Alturas	T 1	T 1	T 2	T 3	T 1	T 2	T 3
h1	1.7	1.2	2.7	2.4	4.2	5.2	2.4
h2	0	0.6	0.6	1.8	0.2	3.5	1.8
h3	1.7	0.6	2.1	0.6	4	1.7	0.6

3.4. Metodologia de cálculo

Neste item serão apresentados os métodos de cálculo da evaporação e da evapotranspiração de referência utilizando-se os métodos do tanque classe “A”, Penman-Monteith e tanque “SM”.

3.4.1. Método da equação de Penman-Monteith

Para se chegar ao valor da evapotranspiração de referência a calculada pelo método de Penman-Monteith segue-se a seqüência apresentada abaixo. Calculando-se, através dos dados meteorológicos, os parâmetros intermediários chega-se à lâmina evapotranspirada expressa na equação 37.

3.4.1.1. Pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do ar

A pressão de saturação, que representa a quantidade máxima de vapor d'água presente no ar a uma dada temperatura, pode ser calculada pela expressão 22.

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}\right) \quad (22)$$

onde e_s é a pressão de saturação de vapor d'água em KPa e t a temperatura média diária em °C, calculada pela formula do 8° DISME tal que:

$$t = \frac{t_9 + t_M + t_m + 2 \cdot t_{21}}{5} \quad (23)$$

onde t_9 é a temperatura do ar medida às 9 h da manhã, t_M é a temperatura máxima diária, t_m é a temperatura mínima diária e t_{21} é temperatura do ar medida às 21 horas

3.4.1.2. Pressão parcial de vapor

A pressão parcial de vapor representa a quantidade de vapor d'água presente no ar a uma determinada temperatura é calculada através da equação 24.

$$e = \frac{e_s \cdot URA}{100} \quad (24)$$

onde e é a pressão parcial de vapor dada em KPa e URA é a umidade relativa do ar média diária dada pela expressão :

$$URA = \frac{URA_9 + URA_{15} + 2 \cdot URA_{21}}{4} \quad (25)$$

onde URA_9 é a umidade relativa do ar medida às 9 h, URA_{15} é a medida às 15 h e URA_{21} às 21 h, todas em percentagem.

3.4.1.3. Declividade da curva de pressão de saturação de vapor

Delta é a tangente à curva de pressão de saturação de vapor do ar para uma temperatura qualquer, e é expressa na equação abaixo.

$$\Delta = \frac{4098}{(t + 237,3)^2} \quad (26)$$

onde Δ é a declividade da curva de pressão de saturação dada em $\text{KPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

3.4.1.4. Constante psicrométrica e constante psicrométrica modificada

A constante psicrométrica (γ) utilizada equivale à $0,0662 \text{ KPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ e, a partir desta calcula-se a constante Psicrométrica modificada de acordo com a expressão 27.

$$\gamma^* = \gamma \cdot (1 + 0,33 \cdot u_2) \quad (27)$$

onde γ^* é a constante psicrométrica modificada, também em $\text{KPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

3.4.1.5. Balanço de radiação de ondas longas

Representando a diferença entre a entrada e saída de energia em forma de ondas longas, o balanço de radiação de ondas longas pode ser estimado através da equação 28.

$$L^* = \left(0,9 \cdot \frac{n}{N}\right) \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e}) \cdot \sigma \cdot \left(\frac{T_M^4 + T_m^4}{2}\right) \quad (28)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman igual a $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$, n é a insolação diária medida em heliógrafo de Campbell-Stoke e N o comprimento astronômico do dia.

3.4.1.6. Distância relativa Sol-Terra

A equação 29 leva em consideração o dia juliano e resulta na distância relativa Sol-Terra.

$$dr = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J\right) \quad (29)$$

onde dr é a distância relativa sol-Terra, dada em radianos e J é o dia juliano.

3.4.1.7. Declinação solar

A declinação solar representa o ângulo de incidência dos raios solares sobre a Terra durante os dias do ano, e pode ser calculada através da equação 30 abaixo.

$$\delta = 0,4093 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot J - 1,405\right) \quad (30)$$

onde δ é a declinação solar dada em radianos.

3.4.1.8. Ângulo horário do pôr-do-sol

O ângulo horário do pôr-do-sol é calculado pela expressão 31.

$$W = \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (31)$$

onde W é o ângulo horário do pôr-do-sol dado em radianos e ϕ é a latitude do local em radianos.

3.4.1.9. Comprimento astronômico do dia

O comprimento astronômico do dia, que é o intervalo de tempo entre o nascer e o pôr-do-sol é calculado através da equação 32.

$$N = \frac{24 \cdot W}{\pi} \quad (32)$$

onde N é o comprimento astronômico do dia dado em horas.

3.4.1.10. Radiação solar incidente no topo da atmosfera

A quantidade de energia que chega ao topo da atmosfera é dependente do ângulo horário do pôr-do-sol, da declinação solar e da latitude, tendo uma relação segundo a expressão 33.

$$K_0 \downarrow = 37,586 \cdot dr \cdot (W \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin W) \quad (33)$$

onde $K_0 \downarrow$ é a radiação solar incidente no topo da atmosfera dado em $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$

3.4.1.11. Radiação solar de ondas curtas incidente

Da radiação que incide no topo da atmosfera apenas uma parcela atinge o solo, que é denominada de radiação solar incidente de acordo com a equação 34.

$$K \downarrow = \left(\alpha + \beta \frac{n}{N} \right) \cdot K_0 \downarrow \quad (34)$$

onde $K \downarrow$ é a radiação incidente dada em $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, α e β são coeficientes da equação de Angström. Para Santa Maria seus valores foram determinados por ESTEFANEL *et alli* (1990) expostos na tabela 5.

Tabela 5. Coeficientes α e β da equação Angström para a região de Santa Maria, determinadas por ESTEFANEL *et alli* (1990) para os doze meses do ano.

m ê s	α	β
j a n e i r o	0 . 2 3 4	0 . 3 6 7 0
f e v e r e i r o	0 . 2 2 0	0 . 3 9 3 7
m a r ç o	0 . 2 2 0	0 . 4 1 1 3
a b r i l	0 . 2 0 9	0 . 4 3 1 1
m a i o	0 . 2 1 5	0 . 4 4 3 5
j u n h o	0 . 2 2 5	0 . 4 4 7 5
j u l h o	0 . 1 9 9	0 . 4 6 5 6
a g o s t o	0 . 1 7 8	0 . 4 8 9 7
s e t e m b r o	0 . 1 8 6	0 . 4 7 9 3
o u t u b r o	0 . 1 8 2	0 . 4 6 7 3
n o v e m b r o	0 . 2 0 0	0 . 4 1 8 7
d e z e m b r o	0 . 2 3 5	0 . 3 6 6 5

3.4.1.12. Balanço de radiação de ondas curtas

Da diferença entre a entrada e a saída de radiação de ondas curtas resulta o balanço de radiação de ondas curtas. Considerando-se o valor albedo segundo a definição de evapotranspiração de referência da FAO este balanço pode ser calculado utilizando-se a equação 35.

$$K^* = K \downarrow \cdot (1 - R) \quad (35)$$

onde K^* é o balanço de radiação de ondas curtas dado em $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, e R é o albedo cujo valor é 0,23, de acordo com as parametrizações da FAO.

3.4.1.13. Balanço global de radiação

O balanço global de energia é obtido pela simples soma dos balanços de ondas curtas e longas como expresso abaixo.

$$Q^* = K^* + L^* \quad (36)$$

onde Q^* é o balanço global de radiação dado em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

3.4.1.14. Evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman-Monteith

Finalmente, possuindo todos os dados anteriores, pode-se calcular a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith.

$$ET_{oPM} = \frac{\Delta \cdot (Q^* - G)}{(\Delta + \gamma^*) \cdot L} + \frac{900 \cdot \gamma \cdot u_2 \cdot (e_s - e)}{(\Delta + \gamma^*) \cdot (t + 275)} \quad (37)$$

onde ET_{oPM} é a evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman-Monteith em mm, G é o fluxo de calor no solo em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, porém seu valor para média diária é considerado zero e L é o calor latente de evaporação igual a $2,45 \text{ MJ.Kg}^{-1}$.

3.4.2. Método do tanque classe “A”

A evaporação medida no tanque classe “A” é obtida simplesmente subtraindo-se as alturas de duas lâminas de água de dois dias consecutivos e somando-se a precipitação ocorrida.

3.4.2.1. Equação de Snyder para cálculo do K_p

Caso seja necessário calcular a evapotranspiração de referência utilizando-se o tanque classe “A”, pode-se fazer a correção através do K_p pela equação de Snyder expressa na equação 38.

$$K_p = 0,482 + 0,024 \cdot \ln B + 0,0045 \cdot URA - 0,000376 \cdot u_{10} \quad (38)$$

onde K_p é o coeficiente de tanque adimensional, B é o comprimento da bordadura considerada, no caso igual a 10 m, URA é a umidade relativa do ar em porcentagem e u_{10} é a velocidade do vento a 10 m de altura em $m.s^{-1}$.

3.4.2.2. Evapotranspiração de referência calculada com o método do tanque classe “A”

Multiplicando-se o coeficiente de tanque (K_p) pela lâmina evaporada obtém-se então a evapotranspiração de referência calculada pelo método do tanque classe “A” segunda a expressão 39.

$$ET_{otca} = Etca * Kp \quad (39)$$

onde ET_{otca} é a evapotranspiração de referência em mm calculada pelo método do tanque classe “A” e $Etca$ é a evaporação medida no tanque.

3.4.3. Método do tanque “SM”

Com o tanque “SM”, assim como o tanque classe “A”, é possível calcular tanto a evaporação da lâmina de água como a evapotranspiração como segue.

3.4.3.1. Medida da evaporação no tanque “SM”

A evaporação no tanque “SM” é calculada a partir da subtração dos níveis entre dois dias consecutivos, mais o armazenado no reservatório, pela equação 41.

$$E_{tsm} = L_{i-1} - L_i + Arm \quad (40)$$

onde L_i é a leitura do dia considerado, L_{i-1} é a leitura do dia anterior e Arm é o volume armazenado no reservatório, já transformado em lâmina, em função da área de captação do tanque.

A ET_o calculada pelo tsm é calculada de modo análogo ao tca, na forma da equação 42 abaixo, multiplicando-se a lâmina evaporada por um coeficiente de tanque .

$$ET_{o_{tsm}} = E_{tsm} \cdot Kp_{SM} \quad (41)$$

3.4.3.2. Cálculo do Kp_{SM} a partir da equação de Penman-Monteith

O coeficiente de tanque para o tanque “SM” (Kp_{SM}), é calculado através da relação entre a evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman-Monteith e a lâmina evaporada no “SM” como mostra a equação 42.

$$Kp_{SM} = \frac{ET_{oPM}}{E_{tsm}} \quad (42)$$

onde E_{tsm} é a evaporação medida no tanque “SM” em mm e Kp_{SM} é o coeficiente de tanque calculado a partir da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith.

3.4.3.3. Calibração dos tanques

A calibração foi feita ajustando-se os valores de Kp às faixas de lâmina evaporada, segundo a metodologia apresentada em LOPES FILHO (2000). Para isso, calculou-se os kp_{SM} através da equação 40 para cada dia. Dividiu-se então, as evaporações do tsm em classes de 1 mm, acompanhadas de seus respectivos KP. Calculou-se as médias, tanto das evaporações, como dos kp dentro destas classes. A partir destas médias obteve-se uma série de pontos, que a partir dos quais, calculou-se uma equação de regressão para os valores

de evaporação média versus os respectivos Kp's. Assim, através da equação obtida, calculou-se os Kp's ajustados. Estes coeficientes foram então aplicados às evaporações do tanque na tentativa de melhor estimar a ETo.

3.4.3.4. Medida da precipitação no tanque “SM”

Fez-se também uma avaliação da capacidade do tanque “SM” estimar a precipitação, comparando-a com a chuva medida em pluviômetro. Esta medida, determinada pelo tanque “SM”, é calculada segundo a equação 43.

$$PPt = el + Arm + Etsm \quad (43)$$

onde PPt é a precipitação medida, usando-se o tanque “SM”, *el* é a elevação do nível da água causada pela chuva, *Arm*, o armazenamento do reservatório e *Etsm* a evaporação do tanque.

3.5. Parâmetros para análise estatística

A análise estatística foi feita baseada na regressão linear simples, obtida entre os valores padrões e os testados, no coeficiente de desempenho (c), expresso pela equação 21, o qual leva em consideração a precisão medida pelo coeficiente de correlação (r) e a exatidão dada pelo índice de concordância de Willmont (d) e expressa pelas equações 19 e 18, respectivamente. Também utilizou-se a estatística do “erro padrão da estimativa” (epe) para análise do erro médio cometido pelo tsm, dado pela equação 12 com “p-2” graus de liberdade, pois a equação de regressão calculada possui dois parâmetros a estimar.

Foram analisados os coeficientes de regressão e de correlação através do teste “t” de Student em nível de 5 % de probabilidade de erro, através das equações 15 e 20, respectivamente.

Os valores de “t” tabelado (t tab) foram retirados da tabela apresentada em STORCK *et alli* (2000).

Utilizou-se o teste não paramétrico de Spearman para avaliar a correlação entre as alturas características dos tanques com os coeficientes de desempenho obtidos. O coeficiente de correlação de Spearman (r_S) é calculado através da equação 44.

$$r_S = 1 - \frac{6 \cdot \sum (O_x - O_y)^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (44)$$

onde O_x e O_y são as ordens das observações de x e y, respectivamente.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise do tanque “SM” em relação ao tanque classe “A”

4.1.1. Fase I

Na primeira fase do trabalho, cujo nível da água estava a 1,7 cm da borda, fazendo-se a comparação entre os tanques “SM” e classe “A”, observa-se que ambas as evaporações, dos períodos quinquidiais e decendiais, comportaram-se de forma semelhante. Estas, podem ser observadas na figura 12, abaixo.

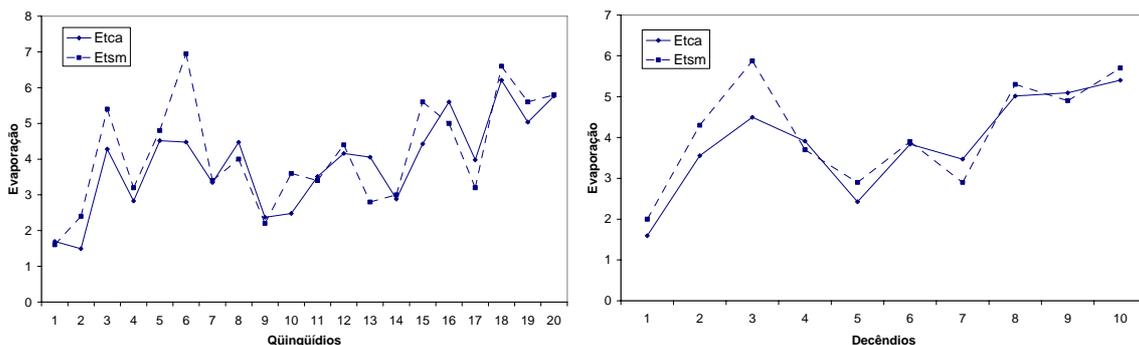


Figura 12. Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente.

A tabela 6 apresenta os dados da análise estatística aplicada a estes dados onde se observam bons coeficientes de correlação e de concordância, o que leva os índices de desempenho a serem classificados como “bom” e “muito bom” para os períodos de 5 e 10 dias, respectivamente. Os erros padrões das estimativas são baixos: 0,87 e 0,62 para quinquídios e decêndios, respectivamente. Os coeficientes b das regressões não diferiram estatisticamente de um, porém para os períodos de 5 dias, não se pode considerar que a reta passe pela origem, ao contrário dos períodos de 10 dias. Ainda, o teste “t” aponta para a existência de correlação linear significativa entre as variáveis em questão.

Tabela 6. Valores dos índices estatísticos calculados para as relações entre o método do tanque classe “A” e o do tanque “SM” para a primeira fase do trabalho com períodos quinquidiais e decendiais.

	Fase I									
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.84	0.90	0.75	0.87	0.97	0.38	-0.19	2.54	6.50	2.10
10 dias	0.91	0.94	0.85	0.62	0.98	0.34	-0.12	2.11	6.10	2.30

As representações gráficas das correlações comentadas acima, para os períodos quinquidiais e decendiais, podem ser vistos na figura 13 abaixo.

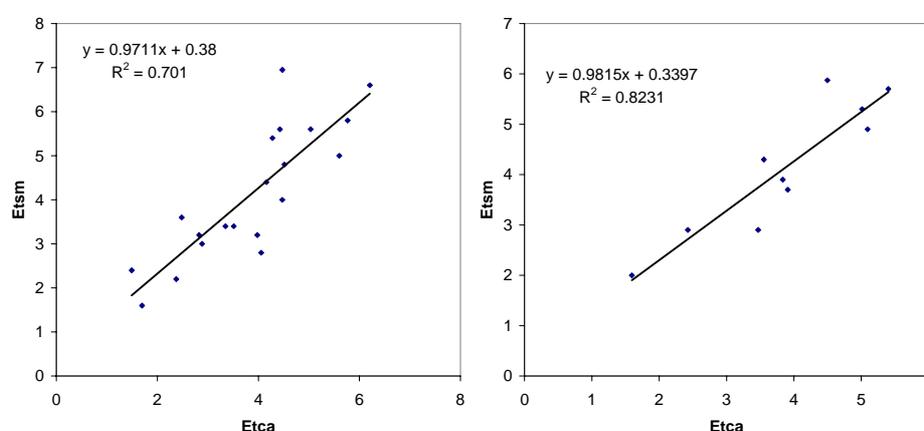


Figura 13. Regressão entre os dados do tanque classe “A” e do tanque “SM” para quinquidiais e decendiais, da esquerda para a direita, respectivamente.

4.1.2. Fase II

Acreditando-se poder melhorar as estimativas do tanque “SM” prosseguiu-se a pesquisa alterando-se o nível do tanque n° 2, testado anteriormente, e acrescentando-se mais dois mini-tanques com níveis diferentes de água. Sendo estes de 1,2; 2,7 e 2,4 cm abaixo de suas bordas e seus drenos ficando a 0,6; 2,1 e 0,6 cm, também da borda, respectivamente para os tanques 1, 2 e 3.

O comportamento do tanque classe “A” e do “SM” é apresentado nas figuras 14 a 16.

* Coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmontt (d), coeficiente de desempenho (c), coeficiente angular (b) e linear (a) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “t” para o coeficiente b (tb), a (ta) e r (tr), valor tabelado do teste “t” com 5% de probabilidade de erro.

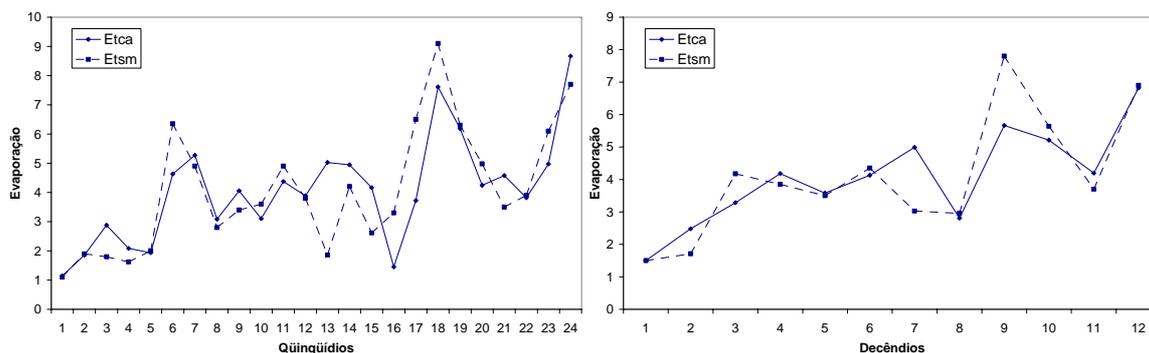


Figura 14. Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 1.

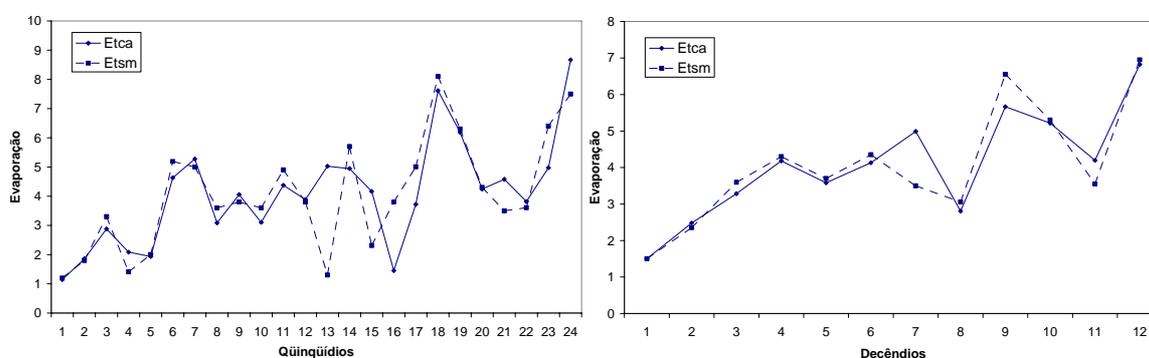


Figura 15. Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 2.

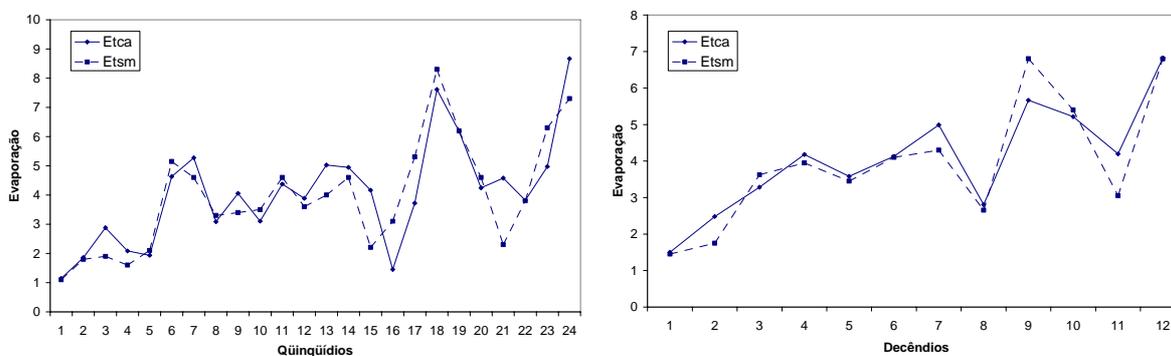


Figura 16. Evaporação do tanque “SM” e evaporação do tanque classe “A” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque n° 3.

A tabela 7 demonstra os índices estatísticos na análise dos dados entre a evaporação medida nos tanques classe “A” e “SM”, para segunda fase. Nota-se, em geral, bons índices de correlação e concordância e conseqüentemente bons índices de desempenho. Em nível quinquídial, o tanque n° 1 obteve desempenho “mediano”, pois apesar de ter uma elevada concordância,

sua correlação com o padrão foi baixa. O mesmo ocorre com o tanque n° 2, que teve o desempenho classificado como “sofrível”. Já o n° 3, teve um desempenho “muito bom”. Para os dados em nível decendial, os tanques 1, 2 e 3 receberam os conceitos “bom”, “muito bom” e “ótimo”, respectivamente.

Tabela 7. Valores dos índices estatísticos calculados para as relações entre o método do tanque classe “A” e o do tanque “SM” para a segunda fase do trabalho com períodos quinqüidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.

Fase II T1										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.69	0.89	0.62	1.25	0.93	0.32	-0.49	2.15	4.52	2.07
10 dias	0.80	0.91	0.73	0.97	1.11	-0.42	0.53	-2.05	4.20	2.22
Fase II T2										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.67	0.89	0.60	1.18	0.83	0.66	-1.23	4.94	4.27	2.07
10 dias	0.88	0.96	0.85	0.58	1.00	-0.02	0.01	-0.14	5.79	2.22
Fase II T3										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.86	0.92	0.79	0.99	0.88	0.36	-1.07	3.22	7.83	2.07
10 dias	0.95	0.96	0.91	0.59	1.10	-0.55	0.86	-4.55	9.21	2.22

Os erros padrões das estimativas demonstram-se maiores para períodos quinqüidiais e apresentam-se mais elevados no tanque n° 1, seguido do n° 2 e n° 3. Para as médias quinqüidiais a reta de regressão obtida não passa pela origem, segundo o teste “t”. O mesmo ocorreu com o tanque n° 3 com médias decendiais, nos demais, a reta pode ser considerada estatisticamente como passando pela origem. O coeficiente *b* foi estatisticamente igual a um para todas as situações nesta fase e todas as correlações foram significativas.

As regressões calculadas para as relações entre os dois tanques estão representadas graficamente nas figuras 17 a 19.

*Coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de desempenho (c), coeficiente angular (b) e linear (a) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “t” para o coeficiente *b* (tb), *a* (ta) e *r* (tr), valor tabelado do teste “t” com 5% de probabilidade de erro.

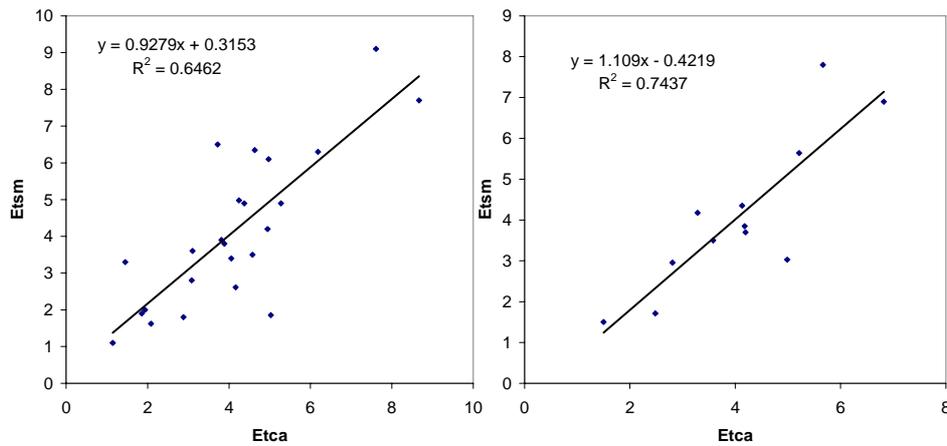


Figura 17. Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 1.

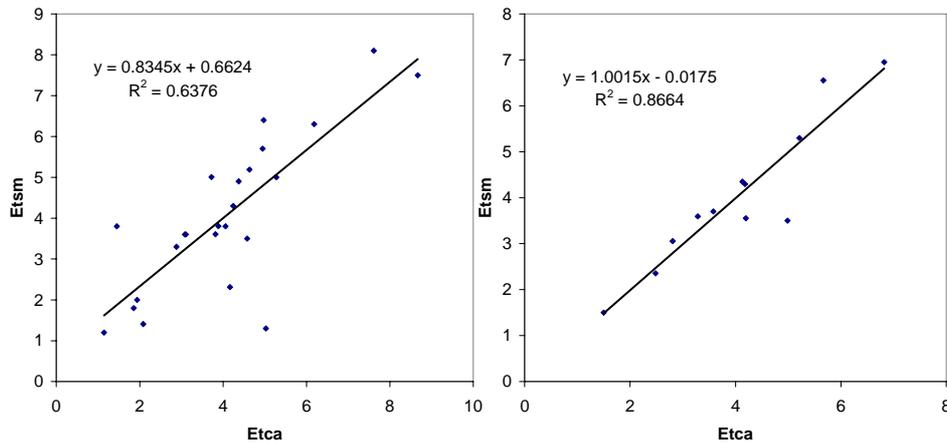


Figura 18. Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 2.

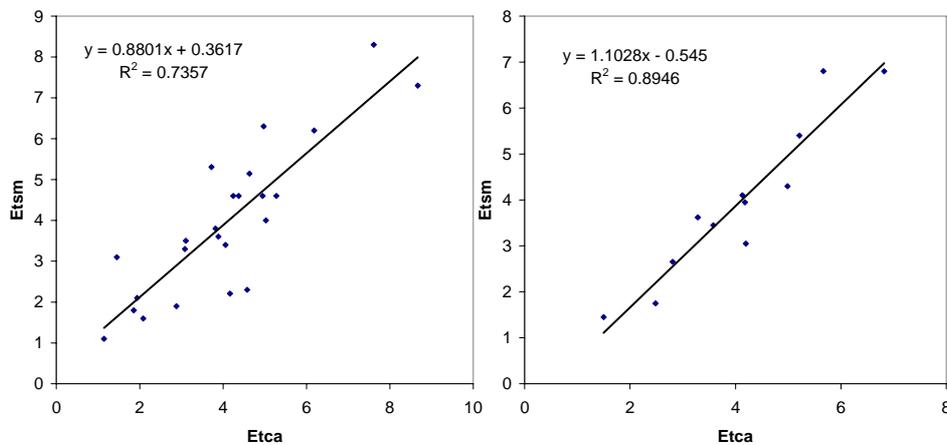


Figura 19. Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 3.

4.1.3. Fase III

Na fase três, com dados de 07/07/2003 a 30/11/2003, as evaporações dos dois tanques comportaram-se segundo o apresentado nas figuras 20 a 22.

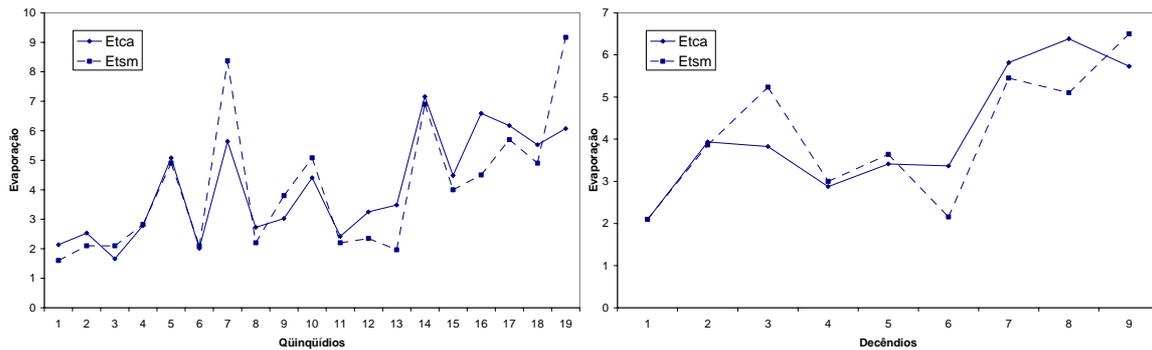


Figura 20. Evaporação do tanque "SM" e evaporação do tanque classe "A" para quinquédios e decédios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque nº 1.

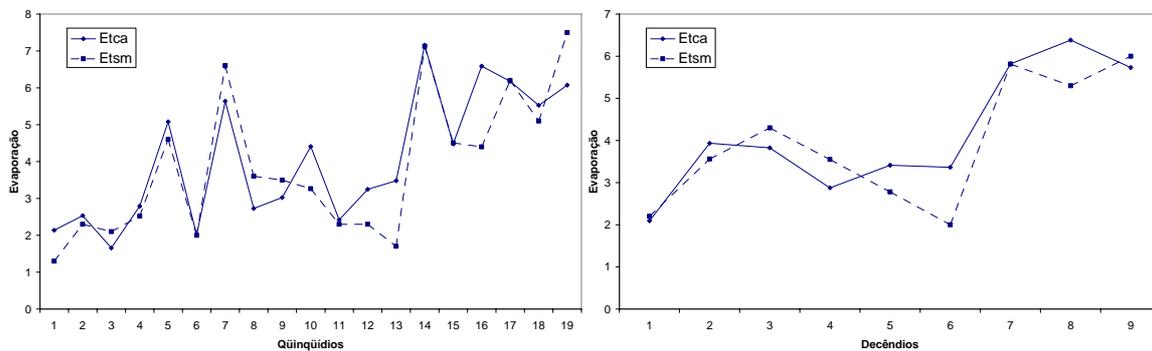


Figura 21. Evaporação do tanque "SM" e evaporação do tanque classe "A" para quinquédios e decédios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque nº 2.

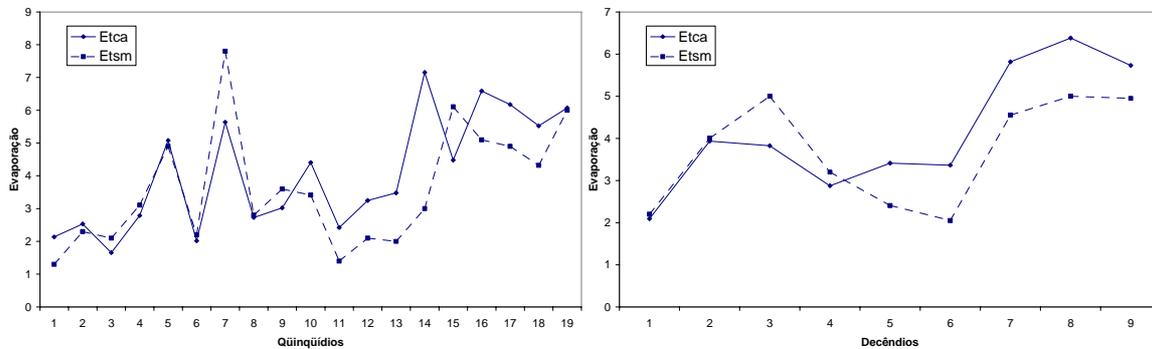


Figura 22. Evaporação do tanque "SM" e evaporação do tanque classe "A" para quinquédios e decédios, da esquerda para a direita, respectivamente, no tanque nº 3.

A tabela 8 apresenta os valores das estatísticas calculadas para a relação entre os tanques “SM” e classe “A”. Nela observa-se que os coeficientes de desempenho são classificados como “bom”, “muito bom” e “sofrível” para os tanques nº 1, 2 e 3, respectivamente com períodos quinquidiais. Para os decendiais são classificados como “muito bom” para os tanques nº 1 e 2 e para o nº 3, como “bom”. Os erros padrões das estimativas para os períodos quinquidiais variam de 0,98 a 1,43 mm e para os decendiais, de 0,74 a 1,02 mm.

Tabela 8. Valores dos índices estatísticos calculados entre o método do tanque classe “A” e do tanque “SM” para a terceira fase do trabalho com períodos quinquidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.*

Fase III T1										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.84	0.90	0.75	1.24	1.09	-0.37	0.50	-2.15	6.35	2.11
10 dias	0.84	0.91	0.77	0.86	0.88	0.45	-0.56	2.11	4.10	2.36
Fase III T2										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.88	0.93	0.82	0.93	0.98	-0.14	-0.16	-1.15	7.82	2.11
10 dias	0.89	0.94	0.83	0.74	0.91	0.16	-0.52	0.93	5.17	2.36
Fase III T3										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.71	0.82	0.58	1.43	0.73	0.64	-1.53	3.63	4.13	2.11
10 dias	0.79	0.85	0.68	1.02	0.68	0.89	-1.65	4.56	3.45	2.36

A equação de regressão do tanque nº 1, apresenta coeficiente linear estatisticamente diferente de um para as médias dos quinquídios, e igual para as dos decêndios. O coeficiente angular pode ser considerado estatisticamente igual a um para os dois casos. No tanque nº 2 ambos os coeficientes, para ambos os períodos, são estatisticamente iguais a seus parâmetros – zero e um. Para o tanque nº 3, os coeficientes *a* diferem estatisticamente de zero, porém os coeficientes *b* não diferem de um.

*Coeficiente de correlação (*r*), índice de concordância de Willmontt (*d*), coeficiente de desempenho (*c*), coeficiente angular (*b*) e linear (*a*) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “*t*” para o coeficiente *b* (*tb*), *a* (*ta*) e *r* (*tr*), valor tabelado do teste “*t*” com 5% de probabilidade de erro.

As representações gráficas das regressões acima são ilustradas nas figuras 23 a 25.

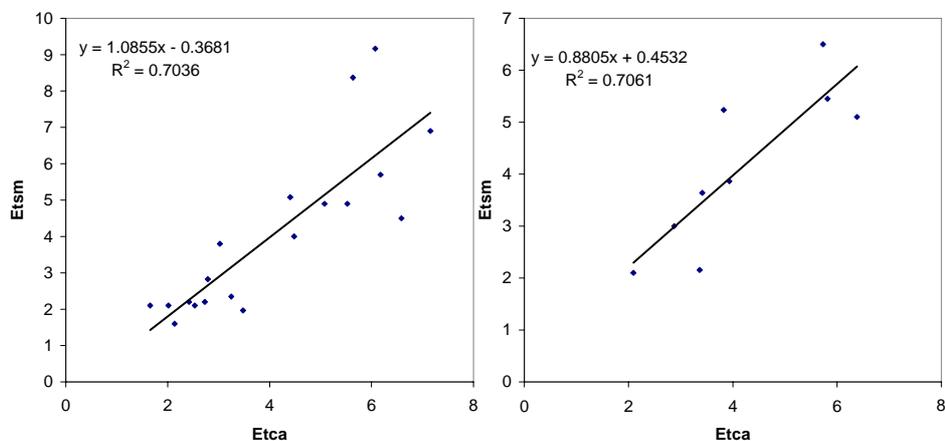


Figura 23. Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 1.

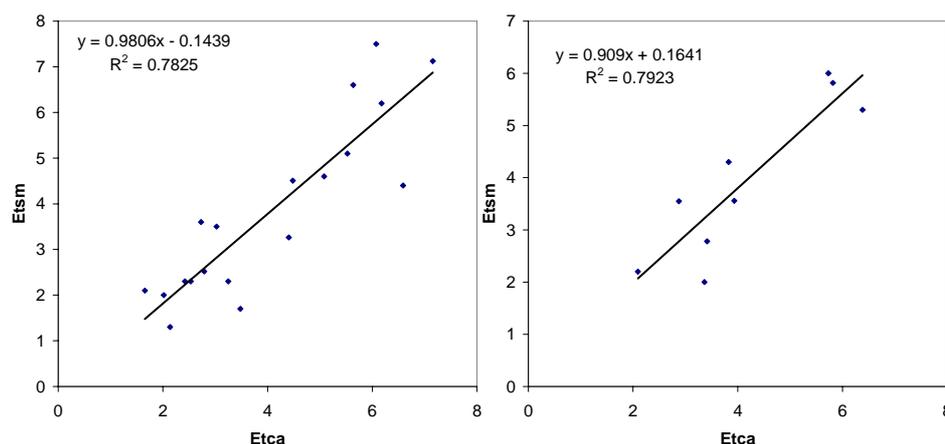


Figura 24. Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 2.

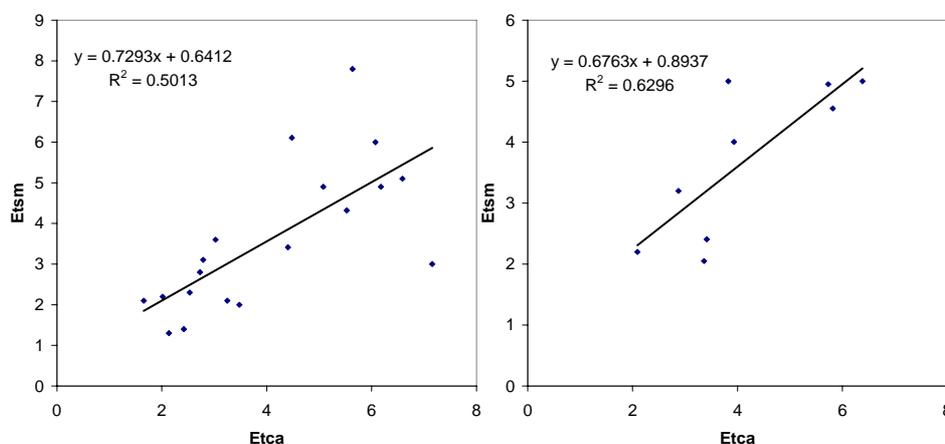


Figura 25. Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 3.

4.2. Análise do tanque “SM” em relação à equação de Penman-Monteith

4.2.1. Determinação dos coeficientes de tanque para os tanques “SM” em função das lâminas evaporadas.

A partir da metodologia apresentada no item 3.4.3.3 obteve-se as equações de regressão para as três fases representadas pelas figuras abaixo.

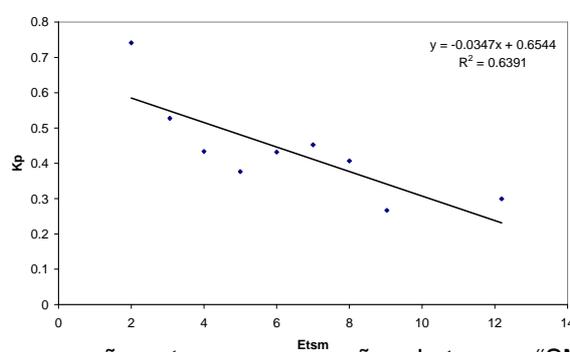


Figura 26. Equação de regressão entre as evaporações do tanque “SM” e seus respectivos Kp para a primeira fase.

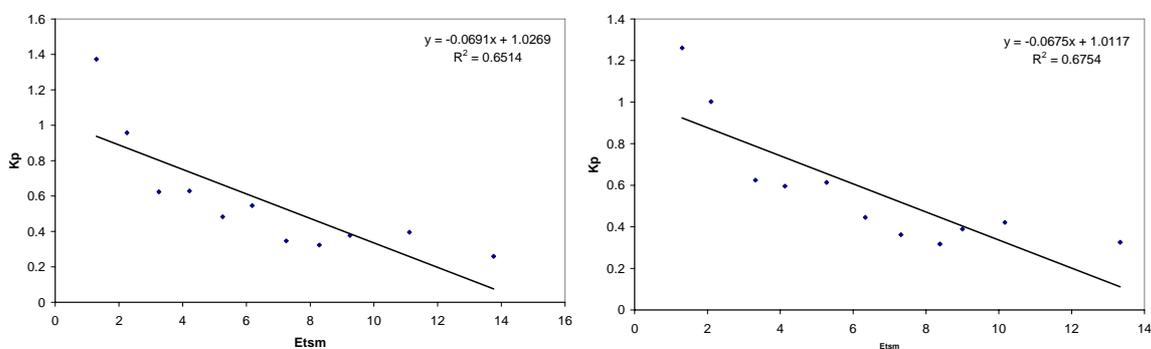
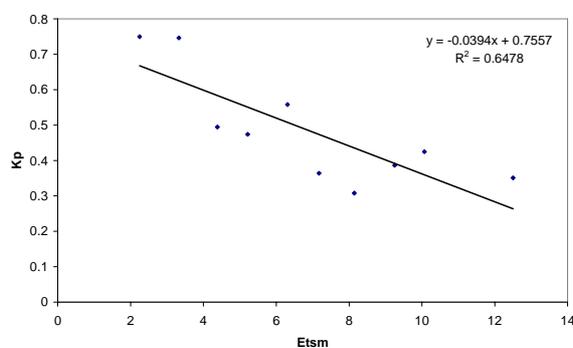


Figura 27. Equação de regressão entre as evaporações do tanque “SM” e seus respectivos Kp para a segunda fase nos tanques n° 1 acima, n° 2 à esquerda e n° 3 à direita.

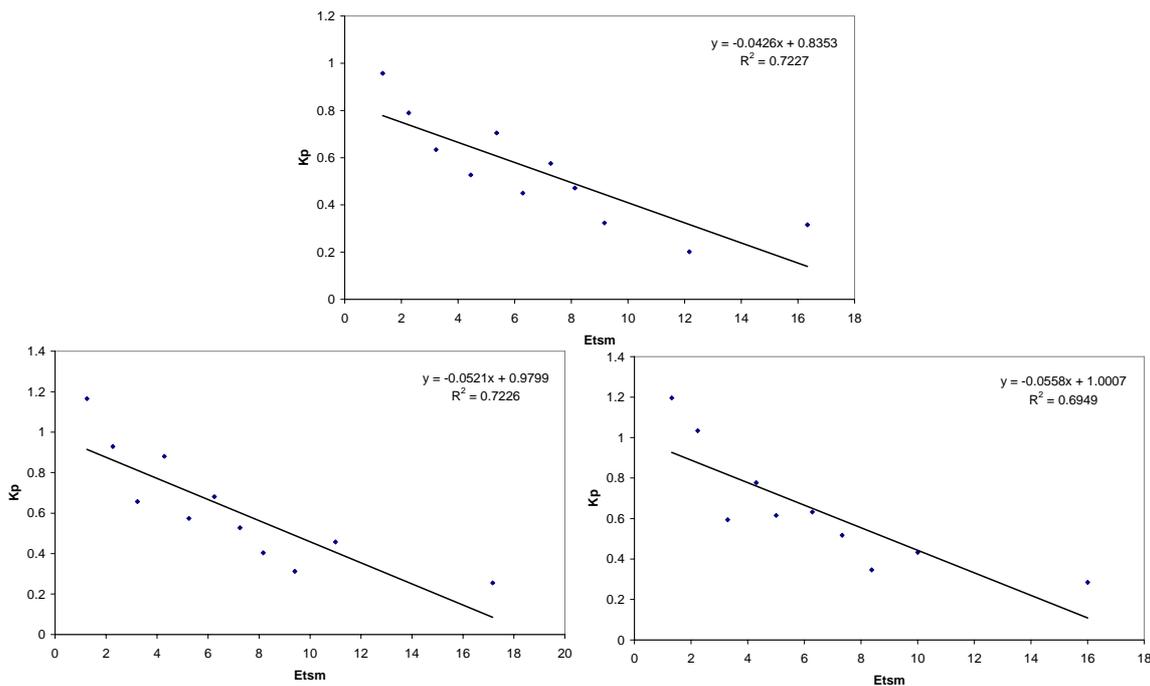


Figura 28. Equação de regressão entre as evaporações do tanque “SM” e seus respectivos Kp para a terceira fase nos tanques n° 1 acima, n° 2 à esquerda e n° 3 à direita.

Estas equações foram, então, utilizadas para calcular as evapotranspições de referencia através do tanque “SM” (equação 42) para que fossem comparadas às calculadas pela equação de Penman-Monteith.

4.2.2.1. Fase I

A figura 29 abaixo exhibe o comportamento das evapotranspições estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith.

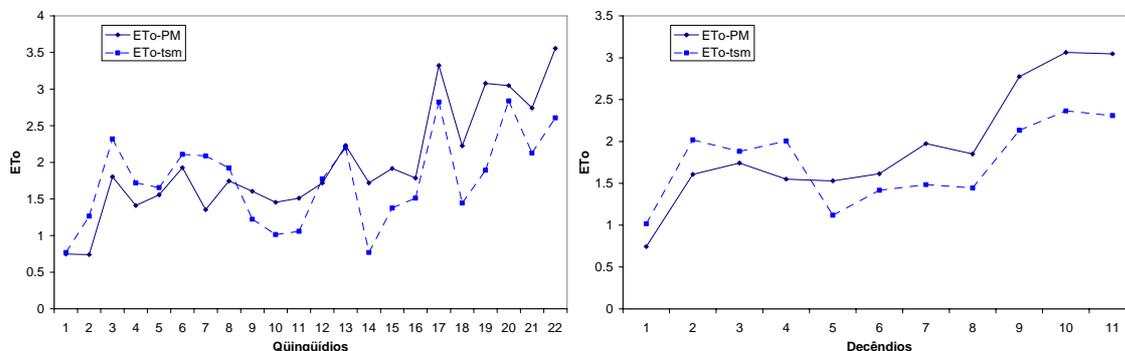


Figura 29. Evapotranspições de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para quinquidários e decendários da esquerda para a direita, respectivamente.

A tabela 9 apresenta os coeficientes estatísticos para a primeira fase onde observa-se bons coeficientes de correlação e concordância. Os coeficientes de desempenho podem ser classificados como “bom” e “mediano” para as médias dos quinquídios e decêndios, respectivamente. Os erros padrões das estimativas são baixos: 0,56 e 0,50 para 5 e 10 dias, respectivamente. Os coeficientes de regressão, a e b , diferem estatisticamente de zero e um para ambos os períodos de dados analisados. O coeficiente r pode ser considerado significativo para estes dados.

Tabela 9. Valores dos índices estatísticos calculados entre o método da equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para a primeira fase do trabalho com períodos quinquídios e decêndios.*

Fase I										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	$t\ tab$
5 dias	0.73	0.94	0.69	0.56	0.59	0.60	-3.40	4.92	4.85	2.08
10 dias	0.79	0.81	0.64	0.50	0.51	0.74	-3.65	5.56	3.88	2.26

Graficamente, as relações entre as duas estimativas podem ser observada na figura 30.

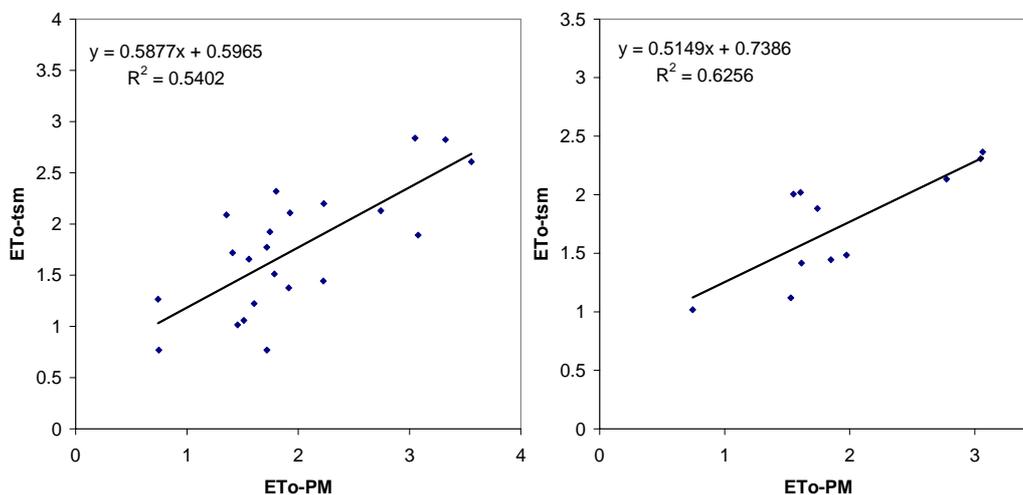


Figura 30. Regressão entre o tanque classe “A” e o tanque “SM” para quinquídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente.

*Coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmontt (d), coeficiente de desempenho (c), coeficiente angular (b) e linear (a) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “ t ” para o coeficiente b (tb), a (ta) e r (tr), valor tabelado do teste “ t ” com 5% de probabilidade de erro.

4.2.2.2. Fase II

O comportamento dos dados de evapotranspiração para a segunda fase são representados nas figuras 31 a 33.

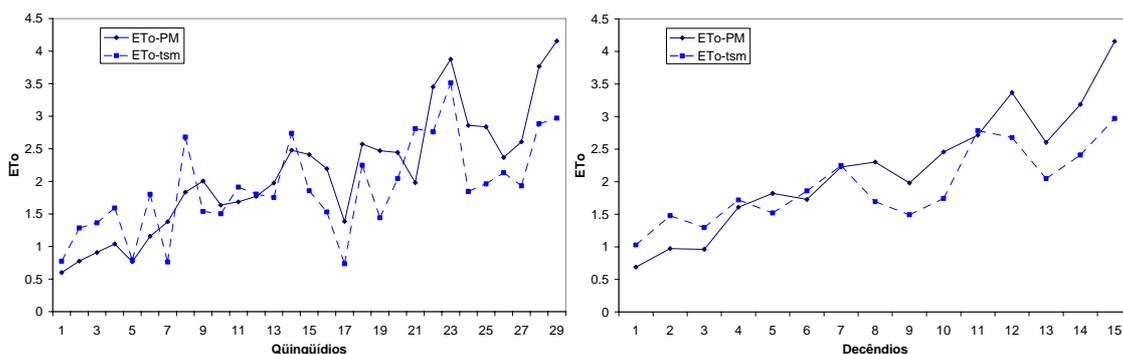


Figura 31. Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 1.

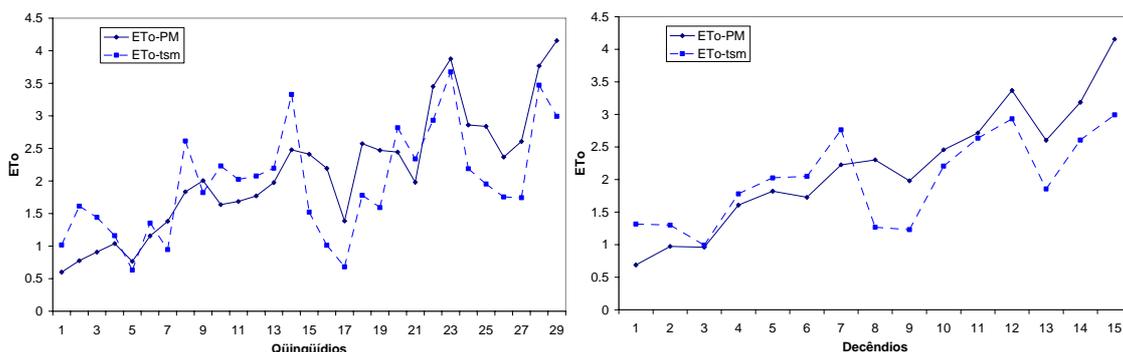


Figura 32. Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 2.

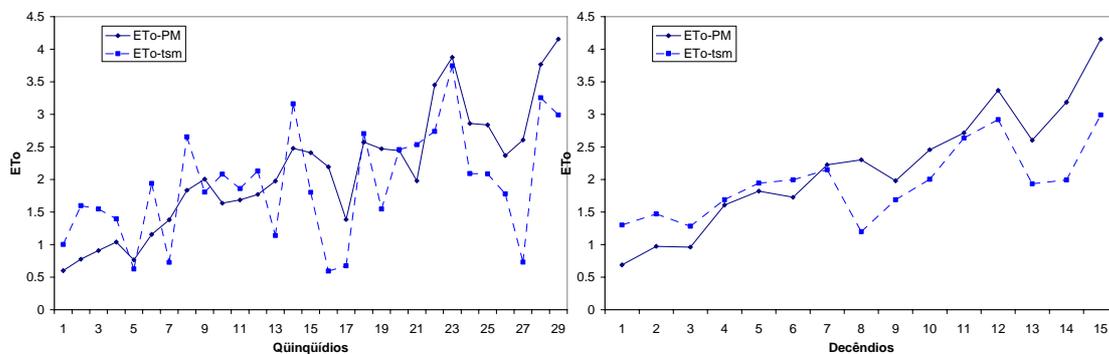


Figura 33. Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque “SM” e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 3.

A tabela 10 mostra que para as médias dos qüinqüídios os coeficientes de desempenho classificados como “bom”, “mediano” e “sofrível” para os tanque n° 1, 2 e 3, respectivamente. Considerando-se as médias decendiais, os conceitos podem ser descritos como “muito bom” para o tanque n° 1 e “bom” para os n° 2 e 3. Os erros padrões das estimativas tiveram valores baixos, todos menores que 0,8 mm. Assim como na fase anterior, os coeficientes de regressão diferiram estatisticamente de seus parâmetros, zero e um, para todos os tanques nos dois períodos analisados. O teste “t” apontou como significativas as correlações entre as duas variáveis para todas as situações analisadas nesta fase.

Tabela 10. Valores dos índices estatísticos calculados entre o método da equação de Penman-Monteith e do tanque “SM” para a segunda fase do trabalho com períodos qüinqüidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.

Fase II T1										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.79	0.85	0.67	0.63	0.60	0.63	-4.48	7.02	6.60	2.05
10 dias	0.90	0.86	0.78	0.57	0.54	0.75	-6.27	10.23	7.43	2.16
Fase II T2										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.75	0.86	0.64	0.65	0.65	0.59	-3.19	5.34	5.94	2.05
10 dias	0.81	0.86	0.69	0.60	0.57	0.75	-3.68	6.42	4.92	2.16
Fase II T3										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.67	0.80	0.54	0.77	0.60	0.63	-3.06	4.88	4.67	2.05
10 dias	0.82	0.82	0.67	0.64	0.48	0.90	-5.62	9.71	5.13	2.16

As regressões obtidas a partir das relações entre as evapotranspirações obtidas através dos métodos da equação de Penman-Monteith e do tanque “SM”, são representadas graficamente nas figuras 34 a 36.

* Coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmontt (d), coeficiente de desempenho (c), coeficiente angular (b) e linear (a) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “t” para o coeficiente b (tb), a (ta) e r (tr), valor tabelado do teste “t” com 5% de probabilidade de erro.

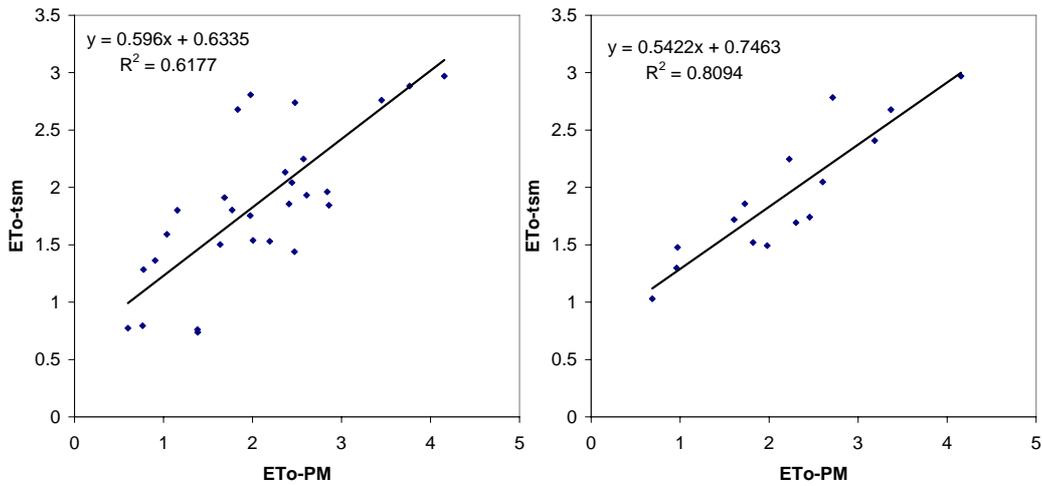


Figura 34. Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 1.

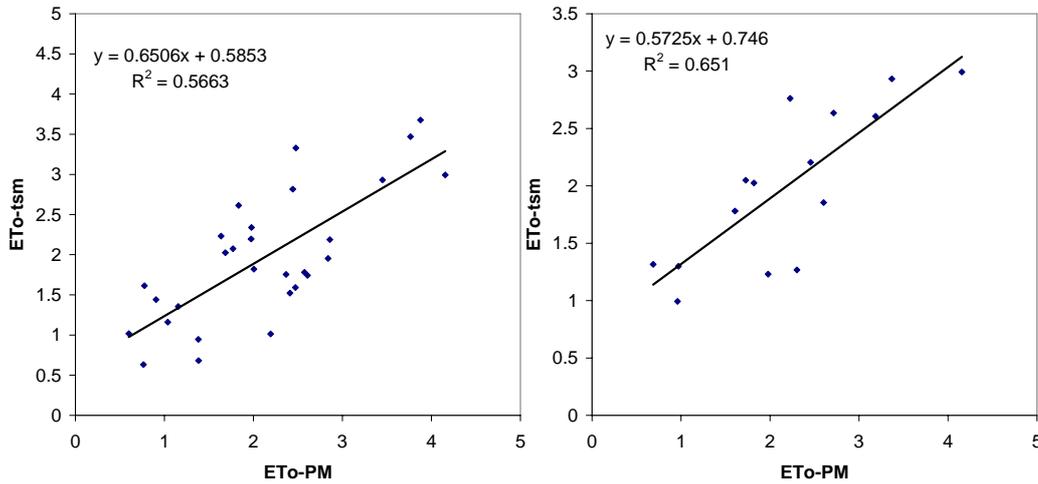


Figura 35. Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 2.

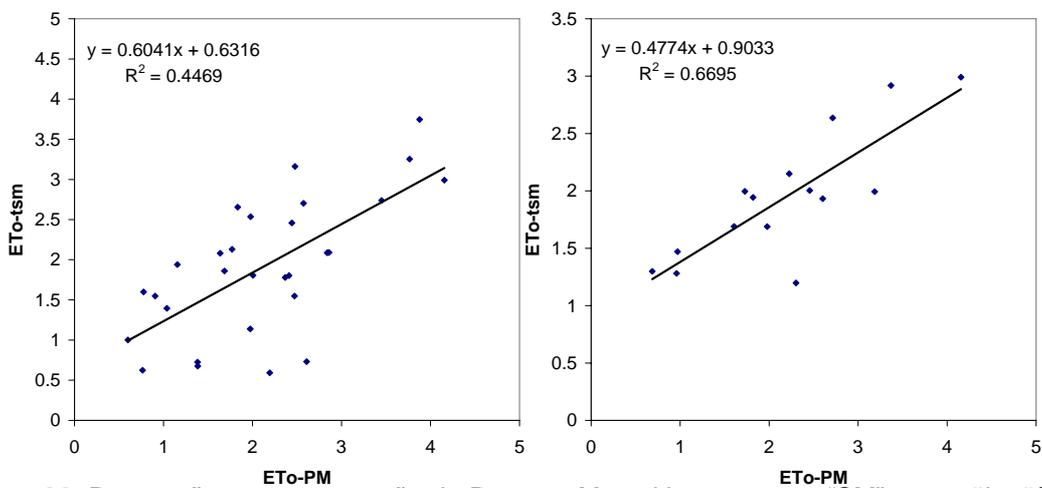


Figura 36. Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para qüinqüídios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 3.

4.2.2. Fase III

Para os dados obtidos na terceira fase do trabalho, os comportamentos das evapotranspirações de ambos os métodos podem ser observados nas figuras 37 a 39.

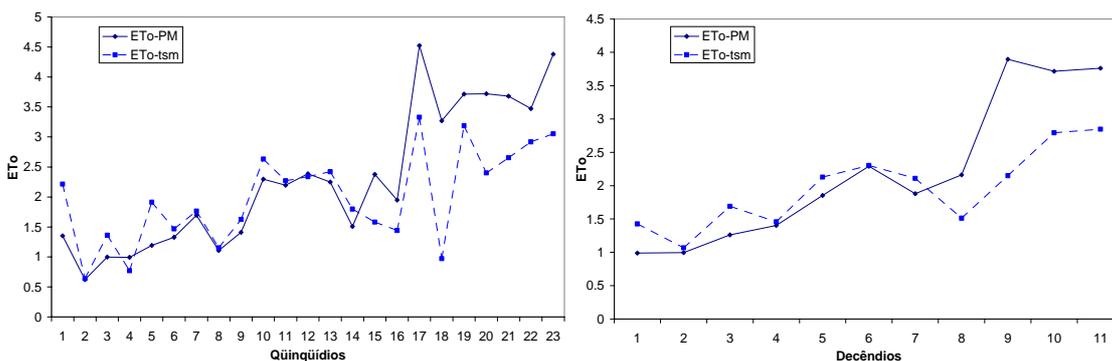


Figura 37. Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque "SM" e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 1.

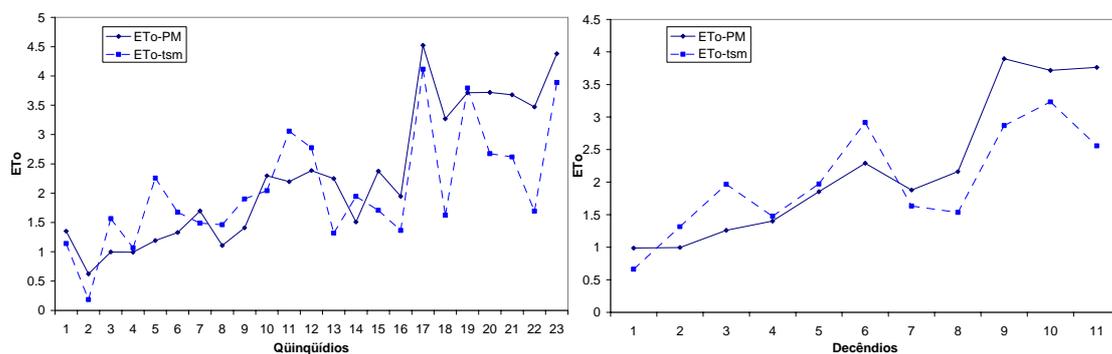


Figura 38. Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque "SM" e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 2.

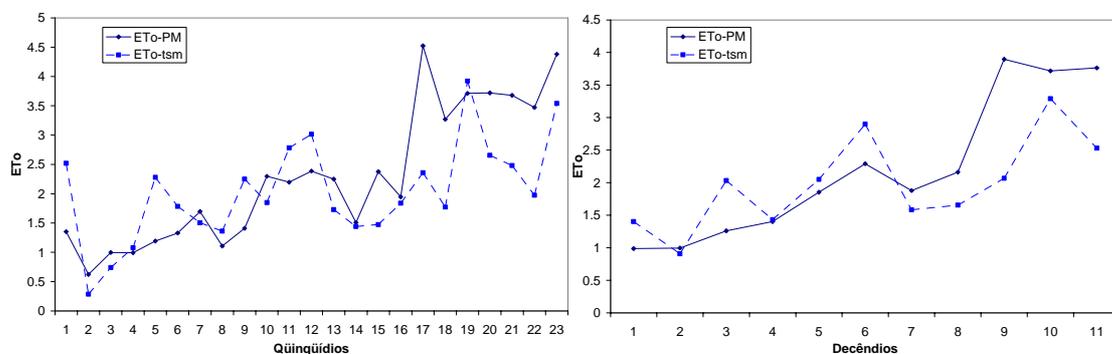


Figura 39. Evapotranspirações de referência estimadas pelos métodos do tanque "SM" e pela equação de Penman-Monteith para qüinqüídios e decêndios da esquerda para a direita, respectivamente no tanque n° 3.

A tabela 11 apresenta os índices estatísticos para a fase três. Nela observa-se que o tanque n° 1 obteve desempenho “mediano” e “bom” para os períodos quinquidiais e decendiais, respectivamente. O tanque n° 2 obteve desempenho “bom” para ambos os períodos, assim como o n° 3 obteve o conceito “sofável”, também para os dois períodos. Os erros padrões das estimativas foram todos pequenos, menores que 1 mm. Nesta fase, os dois coeficientes de regressão, *a* e *b*, diferiram de seus parâmetros – zero e um – assim como ocorreu nas duas fases anteriores. As correlações obtidas entre as variáveis foram significativas para todos os tanques e períodos de dados utilizados, segundo o teste “t”.

Tabela 11. Valores dos índices estatísticos calculados entre o método da equação de Penman-Monteith e do tanque “SM” para a terceira fase do trabalho com períodos quinquidiais e decendiais para os tanques 1, 2 e 3.

Fase III T1										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.77	0.82	0.63	0.81	0.51	0.84	-5.37	9.16	5.53	2.08
10 dias	0.83	0.79	0.66	0.75	0.43	1.01	-5.94	10.50	4.49	2.26
Fase III T2										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.77	0.86	0.66	0.78	0.64	0.61	-3.13	5.23	5.51	2.08
10 dias	0.83	0.87	0.73	0.66	0.60	0.70	-3.05	5.30	4.52	2.26
Fase III T3										
	r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
5 dias	0.67	0.78	0.52	0.91	0.48	0.93	-4.41	7.91	4.10	2.08
10 dias	0.72	0.78	0.56	0.81	0.45	0.99	-3.72	6.73	3.08	2.26

As figuras 40 a 42 representam graficamente as correlações das entre as variáveis avaliadas acima.

* Coeficiente de correlação (*r*), índice de concordância de Willmontt (*d*), coeficiente de desempenho (*c*), coeficiente angular (*b*) e linear (*a*) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “t” para o coeficiente *b* (*tb*), *a* (*ta*) e *r* (*tr*), valor tabelado do teste “t” com 5% de probabilidade de erro.

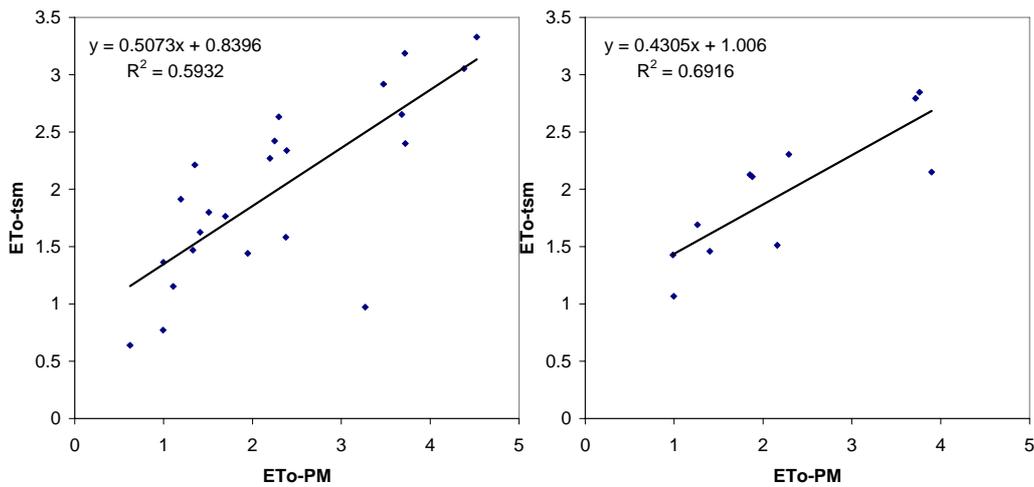


Figura 40. Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para quinquédios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 1.

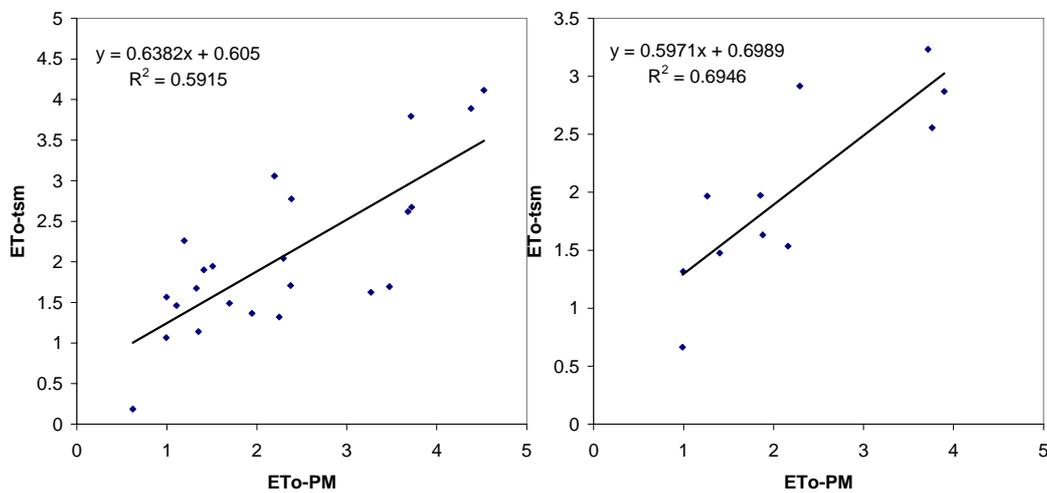


Figura 41. Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para quinquédios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 2.

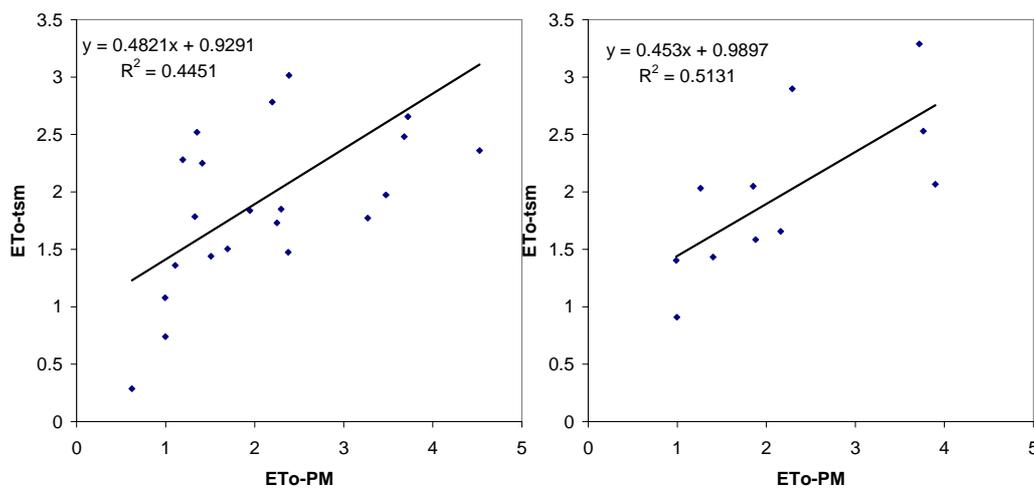


Figura 42. Regressão entre a equação de Penman-Monteith e o tanque “SM” para quinquédios e decêndios, da esquerda para a direita, respectivamente para o tanque n° 3.

4.3. Análise do tanque “SM” na estimativa da precipitação em comparação como pluviômetro

4.3.1. Fase I

No que diz respeito à capacidade do tanque “SM” estimar a chuva ocorrida, o aparelho obteve um desempenho “mediano”, tendo coeficientes de correlação e concordância razoavelmente bons. Ambos os coeficientes de regressão diferiram estatisticamente de seus parâmetros - zero e um.

Um fato importante é que o erro padrão da estimativa obtido é bastante alto, atingindo o valor de 10,8 mm. Considerando-se que a lâmina precipitada entra no cálculo da evaporação, o que pode ser visto através da equação 41 representada diretamente pelo termo “*Arm*” e indiretamente no resultado negativo da subtração “ $L_{i-1} - L_i$ ”, este erro torna-se muito grande. Afinal, 10 mm de evaporação correspondem a, dependendo da época do ano, vários dias ou a um dia de verão com condições meteorológicas extremas. Por isso, acredita-se que melhorando a estimativa da chuva, através, por exemplo, do aumento das alturas características, é possível aprimorar, também, a da evaporação. Os dados comentados acima podem ser vistos na tabela 12.

Tabela 12. Valores dos índices estatísticos calculados entre a precipitação medida em pluviômetro e no tanque “SM”.*

Fase I									
r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
0.81	0.80	0.64	10.81	0.47	3.07	-9.13	52.81	8.06	2.03

A figura 43 exhibe o comportamento do tanque “SM” comparado ao pluviômetro em forma de dispersão com sua respectiva reta de regressão e de forma contínua.

*Coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de desempenho (c), coeficiente angular (b) e linear (a) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “t” para o coeficiente b (tb), a (ta) e r (tr), valor tabelado do teste “t” com 5% de probabilidade de erro.

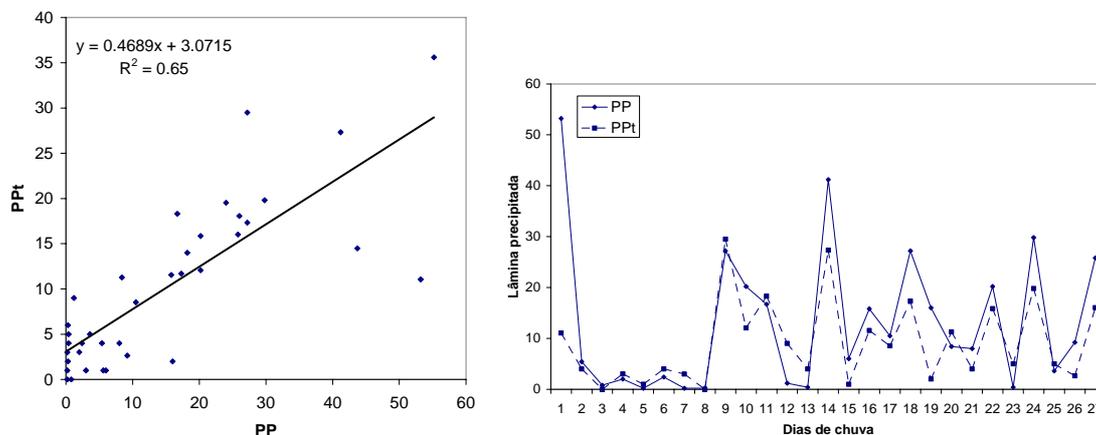


Figura 43. Regressão obtida entre os dados de precipitação do pluviômetro e tanque “SM” à esquerda, e o comportamento da chuva medida em pluviômetro e no tanque “SM” à direita.

4.3.2. Fase II

Os comportamentos da chuva medida no pluviômetro em o tanque “SM” para a segunda fase podem ser vistos na figura 44.

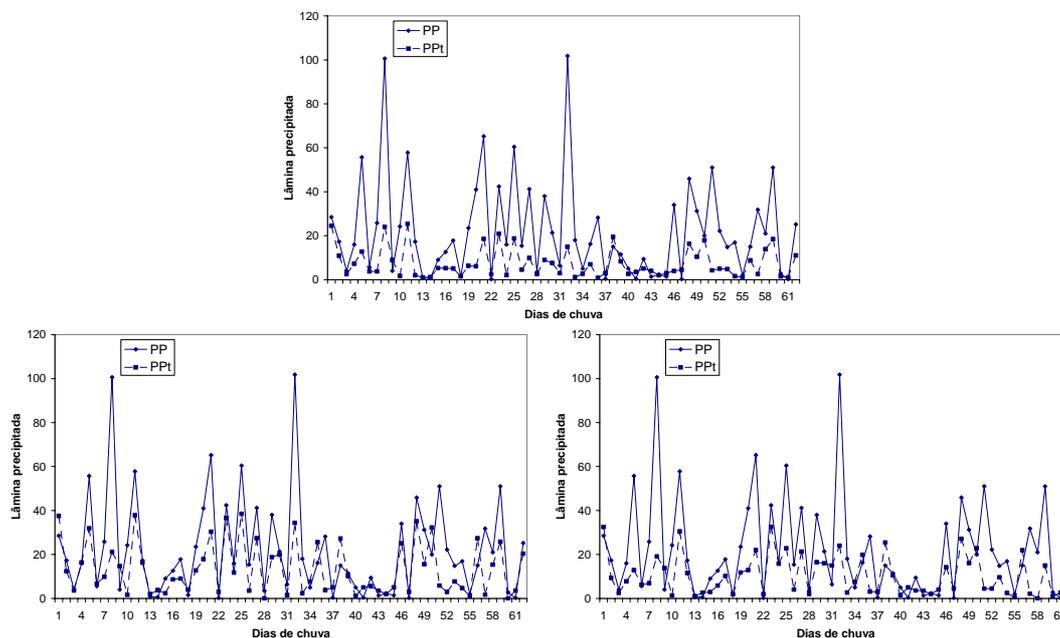


Figura 44. Comportamento da chuva medida em pluviômetro e no tanque “SM” para o n° 1 acima, n° 2 à esquerda e n° 3 à direita.

Os índices das estatísticas da estimativa da chuva feita com o tanque “SM” na segunda fase podem ser observados na tabela 13, onde nota-se que os desempenhos não foram bons, o que era esperado devido à mudança de

horário. Para os tanques n° 1 e 3 os índices *c* foram classificados como “péssimos” e o n° 2 como “mau”.

Tabela 13. Valores dos índices estatísticos calculados entre a precipitação medida em pluviômetro e no tanque “SM”.

Fase II T1									
r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
0.68	0.53	0.36	23.82	0.20	2.96	-28.45	105.76	7.26	2.00
Fase II T2									
r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
0.68	0.69	0.47	19.11	0.36	5.39	-12.85	108.09	7.19	2.00
Fase II T3									
r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
0.60	0.57	0.34	21.99	0.24	5.31	-18.39	128.38	5.78	2.00

Para a chuva, um fenômeno de grande variabilidade e intensidade, uma diferença de algumas horas é bastante significativa. Muito provavelmente, este fraco desempenho é reflexo desta diferença. Os erros padrões das estimativas foram elevados e os coeficientes de regressão, *a* e *b*, para os três tanques, diferem tanto de zero como de um.

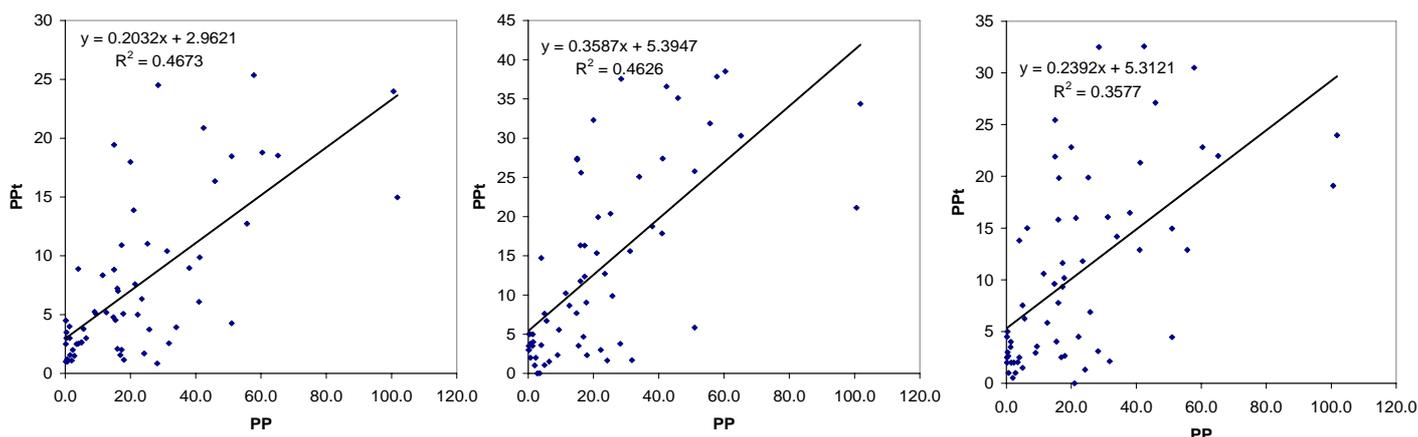


Figura 45. Regressões obtidas entre os dados de precipitação do pluviômetro e tanque “SM” nos tanque 1, 2 e 3 da esquerda para a direita, respectivamente.

* Coeficiente de correlação (*r*), índice de concordância de Willmontt (*d*), coeficiente de desempenho (*c*), coeficiente angular (*b*) e linear (*a*) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “*t*” para o coeficiente *b* (*tb*), *a* (*ta*) e *r* (*tr*), valor tabelado do teste “*t*” com 5% de probabilidade de erro.

4.3.4. Fase III

O comportamento das precipitações medidas pelo pluviômetro e pelo tanque “SM” para a terceira fase estão representadas graficamente abaixo na figura 46.

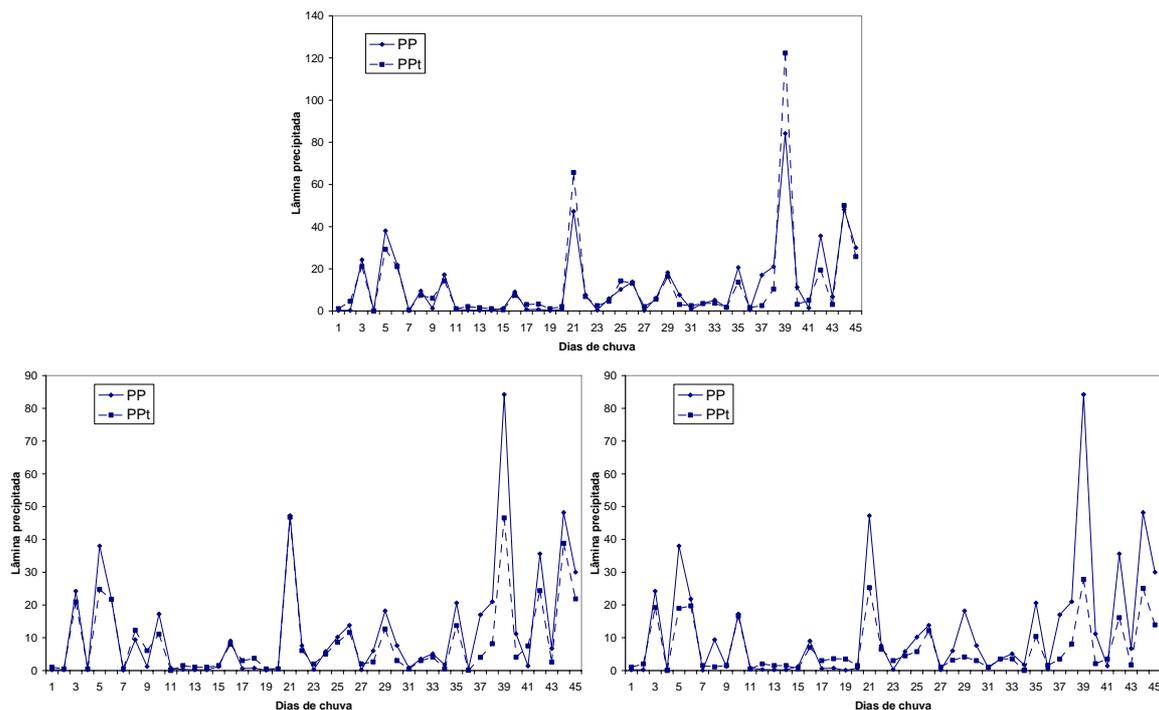


Figura 46. Comportamento da chuva medida em pluviômetro e no tanque “SM” para o n° 1 acima, n° 2 à esquerda e n° 3 à direita.

A tabela 14 mostra que, para a fase III, os desempenhos para os tanques n° 1 e 2 podem ser classificados como “ótimo”, e para o tanque n° 3 como “bom”. Estatisticamente os coeficientes de regressão, a e b , para qualquer dos tanques diferiu de seus parâmetros – zero e um. Os erros padrões das estimativas foram menores que 10 mm nos tanque de bordas mais elevadas (1 e 2) e pouco superior no tanque n° 3, de borda menor. Ainda que as lâminas dos “epe” da chuva sejam elevadas se comparadas com os valores das evaporações, com as bordas mais elevadas conseguiu-se o menor erro neste experimento.

Tabela 14. Valores dos índices estatísticos calculados entre a precipitação medida em pluviômetro e no tanque “SM”.

Fase III T1									
r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
0.94	0.96	0.90	7.93	1.17	-2.08	2.62	-31.47	17.75	2.01
Fase III T2									
r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
0.94	0.93	0.88	7.60	0.66	1.15	-9.87	33.07	18.84	2.01
Fase III T3									
r	d	c	epe	b	a	tb	ta	tr	t tab
0.90	0.77	0.70	11.84	0.41	1.80	-20.31	61.57	13.87	2.01

As correlações entre os dados de precipitação medidos no pluviômetro e no tanque “SM” estão representadas graficamente abaixo na figura 47.

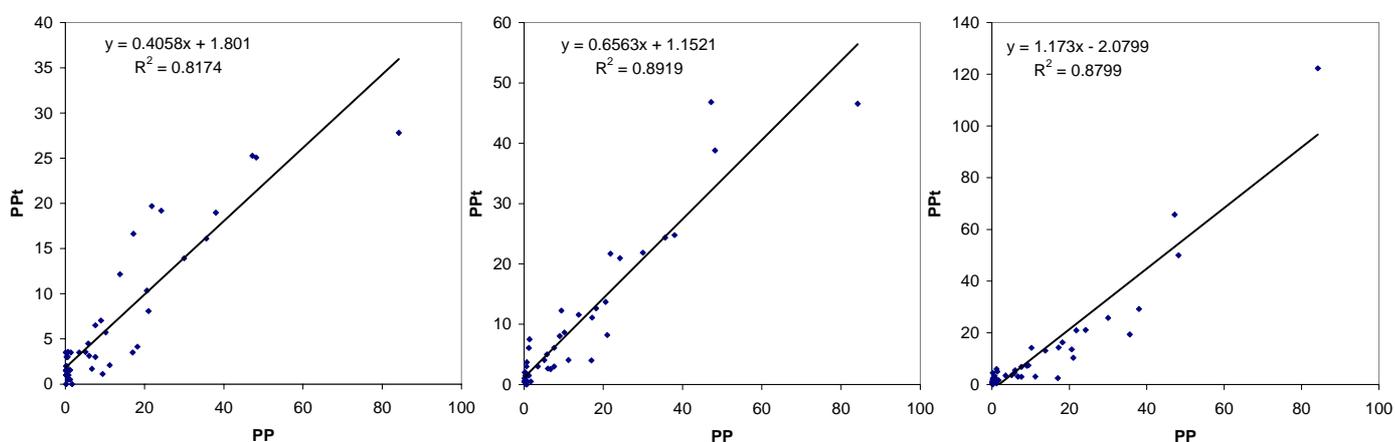


Figura 47. Regressões obtidas entre os dados de precipitação do pluviômetro e tanque “SM” nos tanque 1, 2 e 3 da esquerda para a direita, respectivamente.

* Coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmontt (d), coeficiente de desempenho (c), coeficiente angular (b) e linear (a) da equação de regressão entre os métodos, valores do teste “t” para o coeficiente b (tb), a (ta) e r (tr), valor tabelado do teste “t” com 5% de probabilidade de erro.

4.4. Comentário geral

Utilizando-se o teste não paramétrico de Spearman (tabela15), observa-se não haver correlação significativa entre os desempenhos (c) das estimativas das evaporações do tanque classe “A” ou das evapotranspirações calculadas pelo método de Penman-Monteith, com as alturas características dos tanques (h1, h2 e h3).

Tabela 15. Coeficientes de correlação de Spearman (r_s) entre os desempenhos (c) e as alturas características dos tanques (h1, h2 e h3) testados através do coeficiente tabelado (r_{tab}) para os métodos de Penman-Monteith e tanque classe “A”.

	Tese de Spearman para h1				Tese de Spearman para h2				Tese de Spearman para h3			
	5 dias		10 dias		5 dias		10 dias		5 dias		10 dias	
Penman-Monteith	r_s	-0.29	r_s	0.06	r_s	-0.43	r_s	0.29	r_s	-0.06	r_s	-0.43
	r_{tab}	-0.68	r_{tab}	0.68	r_{tab}	-0.68	r_{tab}	0.68	r_{tab}	-0.68	r_{tab}	0.68
Tanque classe "A"	r_s	0.39	r_s	0.11	r_s	0.26	r_s	-0.05	r_s	-0.17	r_s	-0.11
	r_{tab}	0.68	r_{tab}	0.68	r_{tab}	0.68	r_{tab}	0.68	r_{tab}	0.68	r_{tab}	0.68

No caso da estimativa da chuva, analisaram-se os coeficientes de correlação de Spearman para duas situações: com todos os dados e sem os da fase II, pois, como já comentado anteriormente, estes tiveram seu desempenho afetado pela mudança de horário. Assim, nota-se que no primeiro caso não haveria correlação, porém, retirando-se os dados duvidosos da segunda fase, esta passa a ser significativa (tabela 16).

Tabela 16. Coeficientes de correlação de Spearman (r_s) entre os desempenhos (c) e as alturas características dos tanques (h1, h2 e h3) testados através do coeficiente tabelado (r_{tab}) para a estimativa da chuva.

	Tese de Spearman para h1				Tese de Spearman para h2				Tese de Spearman para h3			
	Todos		Sem a fase II		Todos		Sem a fase II		Todos		Sem a fase II	
Chuva	r_s	0.65	r_s	0.96	r_s	0.40	r_s	0.89	r_s	0.39	r_s	0.94
	r_{tab}	0.80	r_{tab}	0.80	r_{tab}	0.80	r_{tab}	0.80	r_{tab}	0.80	r_{tab}	0.80

Assim, nota-se que o aumento das alturas características promove uma melhora no desempenho dos tanques em estimar a precipitação. Os desempenhos mais elevados e sua relação com as alturas, da água e do dreno

(h_1 e h_3), medidos a partir da borda, podem ser explicados pela menor perda de água por respingo. Já, a melhora de desempenho devido à altura da água em relação ao dreno (h_2), provavelmente é explicada pelo fato da maior altura reduzir a quantidade de água drenada para o reservatório. Isto indicaria que a medição do volume de água armazenada ali, poderia conter erro, assim, é provável que a precisão da proveta ou o modo de coletar o líquido não estejam adequados.

Uma vez sabido que não houve correlação significativa entre os conceitos obtidos pelos índices c e as alturas características, é grande a possibilidade da variação destes conceitos terem ocorrido devido ao acaso, uma vez que as épocas utilizadas para análise são bastante semelhantes. No entanto, seria recomendável fazer testes com períodos mais prolongados para detectar a veracidade desta hipótese.

De modo geral, pode-se dizer que para estimar a evaporação do tanque classe “A” os mini-tanques podem ser considerados, em média, como “bom” em nível quinqüidial e “muito bom” em decendial. Levando-se em consideração a capacidade dos tanques estimar a evapotranspiração calculada através da equação de Penman-Monteith e considerando-se períodos de 5 dias, pode-se, em média, atribuir um conceito “mediano” a estes. Se o período considerado for de 10 dias, é possível admitir um conceito “bom”.

Analisando-se os coeficiente de regressão, a e b , entre os métodos do tanque “SM” e da equação de Penman-Monteith, observa-se não haver mudança nos seus comportamentos, permanecendo todos diferentes de seus parâmetros. Na comparação com o classe “A”, nos períodos decendiais, os coeficientes não diferiram de seus parâmetros, com exceção do tanque n° 3, em que o coeficiente linear diferiu de zero. Em nível quinqüidial, os coeficientes angulares não diferiram de um, mas os lineares diferiram de zero, com exceção do tanque n° 2 na fase III. Na comparação com a chuva, ambos os coeficientes, linear e angular, diferiram de seus parâmetros para todas as situações.

A situação ideal se dá quando o coeficiente linear (a) é igual a zero e o angular (b) igual a um, como ocorreu na comparação com o tanque classe “A” com a média de 10 dias. Assim, levando-se em consideração os baixos erros padrões das estimativas e os bons desempenhos poderia-se estimar a evaporação do tanque classe “A” diretamente. Para as médias de 5 dias, seria necessária uma correção do coeficiente linear. Nas estimativas da evapotranspiração calculada pela equação de Penman-Monteith e da precipitação seria preciso corrigir ambos os coeficientes antes. Porém, para efetuar tais ajustes seriam necessários um período de dados mais longo para se ter uma maior consistência destes parâmetros.

6- CONCLUSÕES

Segundo os dados obtidos é possível concluir que:

O mini-tanque foi capaz de estimar bem a evaporação do tanque classe “A” diretamente com médias decendiais. Para médias qüinqüidiais, deve-se corrigir o parâmetro linear;

O mini-tanque estima de forma razoável a evapotranspiração de referência, sendo mais confiáveis as médias de períodos de 10 dias. Neste caso a estimativa não deve ser feita diretamente, mas sim após uma correção dos coeficientes linear e angular;

A estimativa da chuva melhora significativamente com o aumento da altura da borda e do dreno, mas, assim como a estimativa da evapotranspiração, deve-se corrigir ambos os coeficientes;

As alturas características dos tanques não influenciaram significativamente nas estimativas das evaporações e evapotranspirações.

Como recomendações, ficam :

A coleta de dados por um período mais longo a fim de determinar, de forma mais segura, a eficácia deste mini-tanque e possíveis correções nos coeficientes lineares e angulares;

Fazer a instalação destes mini-tanques em outros locais para comprovar, ou não, a universalidade deste aparelho;

A análise mensal ou por estações do ano para se detectarem possíveis variações de desempenho para estes períodos;

Proceder avaliações em condições controladas para avaliar melhor a perda de água por respingo e as medições de volume de chuva armazenada no reservatório.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; **JESSEN**, M. E.; WRIGH, J. L. et alli. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**. v. 81, p. 650-662. 1989.

ALMEIDA, H. A *et alli* Comparação de dados de evapotranspiração de referência estimados por diferentes métodos. **IRRIGA** v. 4, n. 2, p. 104-119. 1999.

AMORIN NETO, M. da S. **Análise preliminar do desempenho de um sistema de medidas de evaporação para tanque classe A**. 56 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 1981.

BERLATO, M. & FONTANA, D. Previsão climática e sua aplicação na agricultura. In : **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Ed. da UFSM. 2001. p. 98-113.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 5. ed. Viçosa: Ed: Imprensa Universitária, 1989. 596p.

BRASIL PROGAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO. **Tempo de irrigar ; Manual do irrigante – Programa nacional de irrigação, PRONI**. São Paulo, 1987.

BRASIL, Ministério da Integração Regional – Secretaria de Irrigação. **Avaliação econômica financeira de projetos de irrigação**. Brasília : Ed: Secretaria de Irrigação, 1993. 172 p. v.3.

CAMARGO, A. P. & SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, V.5, n.1, p. 89-97. 1997.

CARLESSO, R. *et alli*. Manejo d irrigação por aspersão visando a redução de custos de produção e de energia. In : **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Ed. da UFSM. 2001. p. 84-98.

CAUDURO & DORFMAN Manual de laboratório e de campo para irrigação e drenagem. Porto Alegre, 19[_ _].

CHIEPPE, JR., *et alli* Effect of methods of irrigation control on growth of common bean (*phaseolus vulgaris* L .) under different soil, water tensions. **IRRIGA** v. 5, n. 1, p.10-21, 2000.

CHIN, D. A. & ZHAO, S. Evaluation of evaporation-pan networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.121, n.5,1995.

COSTA NETO, P. L. de O. **Estatística**. 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1987. 263p.

CUNHA, G. R.; *et alli*. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p.111-119,1998.

DALMAGO, G. A.; *et alli*. Avaliação de métodos para determinação da evapotranspiração máxima da cultura do pimentão em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n.2, p. 201-211, 2001.

ESTEFANEL,V. *et alli*. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria,RS- Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, v. 20 n. 3-4, p. 203-218.1990.

EVANGELISTA, A.W.P. **Avaliação de métodos de determinação da evapotranspiração no interior de casa de vegetação em Lavras- MG**. 1999. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras, 1999.

FARIAS, J. R. B. *et alli* Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p.17-22.1994.

FRIZZONE, J. A. **Planejamento otimizado da irrigação**. in: DOURADO NETO, D *et alli* Curso de agricultura irrigada. Piracicaba. Ed. da ESALQ, 1991.cap. 1, p.1-26,190p.

GEORGE, B. A. *et alli*. Decision support system for estimating reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 128, n. 1, p. 1-10, 2002.

GRISMER, M. E. *et alli*. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 128, n. 3, p. 180-184, 2002.

HARGREAVES, G. H. Definig and using reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**,v. 120, n. 6, 1994.

HELDWEIN, A. B.; *et alli*. Evaporação água em estufas plásticas e sua relação com o ambiente externo:2-efeito da espécie cultivada e da época do ano nos valores obtidos com minitanques. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.1, p.43-49, 2001.

IRMAK, S. *et alli* Evaluation of classe A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 128, n. 3, p. 153-159, 2002.

LOPES FILHO, R.P. **Utilização de diferentes tanques evaporimétricos em ambiente protegido.** 2000. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Lavras, 2000.

MACHADO, R. E. & MATTOS, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p.193-197, 2000..

MATZENAUER R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In : BERGAMASCHI, et alli. **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** Porto Alegre: Ed. Universidade/ URGs, 1992. cap. 3, p. 33-47, 125 p.

MATZENAUER, R; *et alli.* Evapotranspiração da cultura do milho. II- Relações com a evaporação do tanque classe "A", com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global, em três épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n.1, p.15-21, 1998.

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.

MENEZES Jr., F. O. G.; *et alli.* Estimativa de evapotranspiração em ambiente protegido mediante a utilização de diferentes evaporímetros. CONGRESSO BRASILEIRO de AGROMETEROLOGIA, 11., 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Ed. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999.

MOTA, F.S. **Meteorologia Agrícola.** 7. ed. São Paulo: Nobel .1989. 376 p.

PEREIRA, A. R. *et alli* **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. p. 9-175. 183 p.

PERES, J. G. & SCARDUA, R. Estudos de métodos agroclimáticos para estimativa da evapotranspiração potencial de referência (eto), segundo DOORENBOS & PRUITT. **Engenharia Rural** , v. 2, n. 2, p. 48-63, 1991.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1990. 188p.

SANTOS, R. & KLAR, A. E. Distribuição da evaporação em estufa plástica na primavera. **IRRIGA**, v. 6, n. 2001.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, n. 1, p. i-xii, 1996.

SORIANO, B. M. A. & PEREIRA, A.R. Estimativa da evapotranspiração de referência para a sub-região da Nhecolândia, Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 1, n. 1, p. 123-129, 1993.

STORCK et alli (2000)

TIBAU, A. O. **Técnicas modernas de irrigação**. 4 ed. São Paulo: Nobel, 1976. 223p.

TUBELIS, A. **A chuva e a produção agrícola**. São Paulo: Nobel, 1988. 85p.

TURCO, J. E. P. *et alli* Aplicação da técnica de determinação de erros no método do tanque classe A. **Engenharia Agrícola**, v. 20, n.1, p. 82-86. Jan.2000.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. **Estrutura e apresentação de monografias, dissertações e teses**. 5. ed. Santa Maria : Ed da Universidade, 2000.

ZANARDI JÚNIOR, v. O sistema estadual de recurso hídricos, uma nova fase para a gestão das águas do Rio Grande do Sul. In : **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Ed. da UFSM. 2001. p. 163-165.