

DANIEL GONÇALVES GOMES JUNIOR

**CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM E
COMPARAÇÃO DE SUA MEDIDA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM A
ESTIMATIVA OBTIDA PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE (1948)**

BOTUCATU – SP

2017

DANIEL GONÇALVES GOMES JUNIOR

**CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM E
COMPARAÇÃO DE SUA MEDIDA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM A
ESTIMATIVA OBTIDA PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE (1948)**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Irrigação e
Drenagem)

Orientador: Prof.Dr.Enzo Dal Pai

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

BOTUCATU – SP

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G633c Gomes Junior, Daniel Gonçalves, 1985-
Construção e calibração de um lisímetro de pesagem e
comparação de sua medida de evapotranspiração com a es-
timativa obtida pelo método de Thornthwaite (1948) /
Daniel Gonçalves Gomes Junior.- Botucatu: : [s.n.],
2017
100 p.: il., color. , grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Enzo Dal Pai
Coorientador: Alexandre Dal Pai
Inclui bibliografia

1. Evapotranspiração. 2. Lisímetro. 3. Balanço hídrico
4. Irrigação. I. Dal Pai, Enzo. II. Dal Pai, Alexandre.
III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita
Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agro-
nômicas. IV. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM LISÍMETRO DE PESAGEM E COMPARAÇÃO DE SUA MEDIDA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM A ESTIMATIVA OBTIDA PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE (1948)

AUTOR: DANIEL GONÇALVES GOMES JUNIOR

ORIENTADOR: ENZO DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ENZO DAL PAI
Depto de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI
Depto de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. ERICO TADAO TERAMOTO
Depto. de Engenharia e Pesca / UNESP - Campus Experimental de Registro

Botucatu, 25 de agosto de 2017

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço ao apoio que sempre recebi de minha família. Com maior destaque meus agradecimentos a Benedita N. Gomes, Daniel G. Gomes, Paulo H. Gomes e Maria Beatriz M. Ouro.

Quanto ao corpo docente gostaria de agradecer ao Prof. Dr. João Francisco Escobedo, ao meu orientador Prof. Dr. Enzo Dal Pai e coorientador Alexandre Dal Pai que deram todo suporte teórico e tecnológico para a elaboração do projeto. Gostaria também de agradecer aos professores Adriano Wagner Ballarin, Antonio Evaldo Klar, Érico Tadao Teramoto e Rodrigo Máximo S. Román.

Meu amplo agradecimento ao apoio que recebi da instituição como um todo, sem a plena integração do sistema técnico/administrativo este trabalho jamais teria sido finalizado.

Agradeço também a amigos e profissionais da área que não mais poderão seguir o caminho ao meu lado. Espero que em algum dia tenham a oportunidade de ler este trabalho.

Ofereço este trabalho e agradeço aos pesquisadores e docentes José Geanini Peres e Rubismar Stolf grandes conhecedores da área de estudo da qual me dedico.

Meus agradecimentos ao Eng. Agrônomo Lucas C. Lenz e aos técnicos Firmo Sousa Campos e Marcelo Felipe Matias que acompanharam parte da elaboração do projeto.

Também agradeço ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

A determinação com precisão da necessidade de água das culturas vem se tornando cada vez mais necessária, principalmente devido à escassez dos recursos hídricos e pela alta demanda hídrica do setor agrícola. Sendo assim, a evapotranspiração é utilizada atualmente como parâmetro chave para manejar de maneira mais eficiente os sistemas de irrigação. A preocupação com a correta mensuração deste parâmetro não é algo recente, data de estudos do século passado iniciados com conhecimento puramente físico do processo de evaporação da água e tendo em seguida a atribuição de parâmetros fisiológicos da planta, devidamente a transpiração.

Este trabalho é composto por dois capítulos.

O 1º Capítulo, intitulado “Construção de lisímetro de pesagem de seção circular para a medição da Evapotranspiração de Referência (ET_0): Sistema com três células de carga.” apresenta um trabalho focado nos aspectos construtivos do equipamento. Parâmetros geométricos foram utilizados para determinar o melhor ponto de inserção das células de carga no equipamento. De outra forma, uma análise detalhada de parâmetros físicos do solo foi procedida com a preocupação da representatividade do perfil do solo onde o sistema radicular da cultura se desenvolveu. A calibração do equipamento foi feita em função da disponibilidade total de água no solo (DTA ou CAD) calculada de 74 mm. Outros dados apresentados são os gráficos da calibração e exemplos de períodos de medidas.

O 2º Capítulo, intitulado “Estudo comparativo da Evapotranspiração de Referência (ET_0) medida por lisímetro de pesagem e estimada pelo método de Thornthwaite (1948): Análise em escala diária.” apresenta um trabalho que procura comparar a medida obtida do equipamento com a estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso de um dos modelos mais clássicos desta área de estudo. Dados como precipitação, temperatura mínima, máxima e média foram medidos e apresentados. Uma análise comparativa em relação à normal climatológica do local de estudo também faz parte deste capítulo. Ajustes com relação aos coeficientes utilizados na equação original foram feitos para poder se trabalhar em escala diária.

Palavras-chave: Evapotranspiração, lisimetria, modelo de estimativa.

ABSTRACT

The precise determination of the water requirement from crops is becoming increasingly necessary, mainly due to the scarcity of water resources and the high water demand of the agricultural sector. Therefore, evapotranspiration is currently used as a key parameter to manage irrigation systems more efficiently. The concern about the correct measurement of this parameter is not something recent, date of studies from the last century initiated with purely physical knowledge of the water evaporation process and having then the attribution of physiological parameters of the plant, properly the transpiration.

This work is composed of two chapters.

The 1st Chapter entitled "Construction of a circular section weighing lysimeter for the measurement of Reference Evapotranspiration (ET_0): Three Load Cell System." presents a work focused on the constructive aspects of the equipment. Geometric parameters were used to determine the best insertion point of the load cells at the equipment. Otherwise, a detailed analysis of soil physical parameters was carried out with the concern of the representativeness of the soil profile where the root system of the crop could develop. The calibration of the equipment was done according to the available soil water capacity (ASW) calculated to 74 mm. Other data presented here are the calibration graphs and periods of measurements examples.

The 2nd Chapter, entitled "Comparative study of Reference Evapotranspiration (ET_0) measured by weighing lysimeter and estimated by the Thornthwaite methodology (1948): Daily-scale analysis." presents a work that seeks to compare the measurement obtained from the equipment with the estimation of the Reference Evapotranspiration using one of the most classic models of this study area. Data such as precipitation, minimum, maximum and average temperature were measured and presented. A comparative analysis in relation to the climatological normal from the study site is also part of this chapter. Adjustments within respect to the coefficients used in the original equation were made to be able to work on a daily scale.

Key-words: Evapotranspiration, estimative model, lisimetry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

- FIGURA 1** – Desenho esquemático da variação do armazenamento de água no sistema solo-água-planta-atmosfera 22
- FIGURA 2** – Área da estação evapotranspirométrica e local de amostragem de solo e construção do lisímetro 31
- FIGURA 3** – Relação de áreas de círculos..... 35
- FIGURA 4** – Desenho esquemático da estrutura de alvenaria do lisímetro de pesagem, vista superior 39
- FIGURA 5** – Desenho esquemático dos pontos de inserção das células de carga do lisímetro, vista superior..... 40
- FIGURA 6** – Desenho esquemático da estrutura de alvenaria do lisímetro de pesagem, vista frontal 40
- FIGURA 7** – Diagrama textural proposto pelo U.S.D.A – *United States Department of Agriculture* 56
- FIGURA 8** – Relação entre a variação das lâminas de água (relativa à capacidade total de água no solo – CTA ou CAD; mm) e tensão (mV/V) emitida pelas células de carga, o termo “entrada” é referente ao carregamento e o termo “saída” se refere ao descarregamento do sistema 62
- FIGURA 9** – Regressão linear e equação ajustada utilizada na programação do datalogger (x = tensão em mV/V; y = CTA ou CAD em milímetros) 63
- FIGURA 10** – Variação da água disponível do solo em função do processo de evapotranspiração 64
- FIGURA 11** – Respostas do lisímetro à irrigação e precipitação 65

CAPÍTULO 2

- FIGURA 1** – Série histórica de temperatura e precipitação para a cidade de Botucatu-SP, base de dados de 40 anos (1971 – 2011) 75
- FIGURA 2** – Fotoperíodo (N) e radiação solar incidente no topo da atmosfera (Q_0) ao longo do ano para a cidade de Botucatu-SP (22°50' S; 48°25' W)..... 76
- FIGURA 3** – Comparação entre os valores de evapotranspiração medidos por lisímetro de pesagem e estimados pelo método de Thornthwaite (1948) em escala diária..... 90

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 1

- QUADRO 1** – Camadas representativas de amostragem e principais características dos blocos utilizados para recompor o perfil do solo 32
- QUADRO 2** – Material e suas medidas utilizadas como ponto de partida para a execução da planta baixa do projeto 38
- QUADRO 3** – Metodologia aplicada para reestruturação do perfil do solo 44

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1 – Divisão das culturas em grupos em função de sua sensibilidade ao déficit hídrico	49
TABELA 2 – Fator de disponibilidade de água no solo em função do grupo de cultura e da demanda evaporativa da atmosfera	49
TABELA 3 – Calibração do lisímetro de pesagem, pares de entrada e saída	52
TABELA 4 – Análise granulométrica e densidade da partícula (ρ_p) do solo do local de estudo	54
TABELA 5 – Valores médios das umidades volumétricas na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α) do solo em função da umidade de saturação (α_1) e em função das densidades do solo e das partículas (α_2), umidade gravimétrica (μ) do solo previamente à calibração e intervalo hídrico do solo	55
TABELA 6 – Valores de densidade do solo, antes e após ter sido reestruturado ...	57
TABELA 7 – Resultados da análise química do solo	58
TABELA 8 – Valores de temperatura e da evapotranspiração de referência estimado pelo método de Thornthwaite (1948) para a cidade de Botucatu-SP, base de dados com normal climatológica de 40 anos (1971 – 2011) ..	59

CAPÍTULO 2

TABELA 1 – Valores de temperatura e de precipitação para a cidade de Botucatu-SP, base de dados com normal climatológica de 40 anos (1971 – 2011)	75
TABELA 2 – Valores de evapotranspiração (ET_0) medida pelo lisímetro e estimada pelo modelo de Thornthwaite (1948) e fatores utilizados para suas determinações no período de análise: medidas de precipitação (P; mm), drenagem em profundidade (DP; mm), irrigação (I; mm), fotoperíodo (N; horas), correção (Cor), variação de massa (ΔM) e temperatura média diária (T.média).....	82
TABELA 3 – Resultados da análise estatística e da análise variância de comparação dos pares de médias apresentados no experimento	89

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL	19
	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
1.	CAPÍTULO 1 - CONSTRUÇÃO DE LISÍMETRO DE PESAGEM DE SEÇÃO CIRCULAR PARA A MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0): SISTEMA COM TRÊS CÉLULAS DE CARGA	25
1.1	RESUMO	25
1.2	ABSTRACT.....	26
1.3	INTRODUÇÃO.....	27
1.4	MATERIAL E MÉTODOS	29
1.4.1	Caracterização da área de estudo.....	29
1.4.2	Análise do perfil do solo.....	29
1.4.2.1	Amostragem do perfil do solo	29
1.4.2.2	Análise física e química do solo.....	32
1.4.3	Aspectos construtivos do equipamento	34
1.4.3.1	Fundamentos matemáticos: estrutura e pontos de inserção das células de carga	34
1.4.3.2	Aquisição de dados e sensores.....	41
1.4.4	Recomposição do perfil do solo.....	42
1.4.5	Cálculo da água disponível no solo	46
1.4.6	Calibração.....	51
1.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
1.6	CONCLUSÕES.....	67
1.7	REFERÊNCIAS	68
2.	CAPÍTULO 2 - ESTUDO COMPARATIVO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) MEDIDA POR LISÍMETRO DE PESAGEM E ESTIMADA PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE (1948): ANÁLISE EM ESCALA DIÁRIA	70
2.1	RESUMO	70
2.2	ABSTRACT.....	71
2.3	INTRODUÇÃO.....	72

2.4	MATERIAL E MÉTODOS	74
2.4.1	Caracterização da área de estudo	74
2.4.2	Estimativa da evapotranspiração de referência segundo o modelo de Thornthwaite (1948)	76
2.4.3	Medição da evapotranspiração pelo uso da técnica de lisimetria.....	79
2.4.4	Análise estatística dos dados obtidos	80
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
2.6	CONCLUSÕES	92
2.7	REFERÊNCIAS.....	93
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS.....	95
	ANEXO – IMAGENS DAS ETAPAS DO PROJETO	97

INTRODUÇÃO GERAL

O principal fundamento deste trabalho é apresentar, para sua localidade de estudo e região, melhorias para o setor produtivo agrícola buscando uma forma mais adequada de mensurar o consumo de água do meio ambiente.

Reconhecidamente, o setor agroindustrial possui significativo destaque quando se trata de gerar impactos na economia e possui influência no mercado quando se trata do consumo e/ou do próprio manejo dos recursos hídricos no Brasil.

Essa questão, atual no nosso país, já é discutida há muitos anos em outros países desenvolvidos (p. ex. países do continente Asiático, Europeu e América do Norte) e as preocupações, que aqui são discutidas hoje em dia, são provenientes do início da década de 1960.

Este trabalho apresenta inicialmente uma revisão de literatura que trata sobre termos e questões referentes à evapotranspiração. Em seguida e, ainda dentro desta revisão, explicações são apresentadas sobre a técnica da lisimetria.

De forma subsequente os estudos que foram desenvolvidos neste projeto foram divididos em dois capítulos e assim serão apresentados.

REVISÃO DE LITERATURA

A técnica da Lisimetria está diretamente relacionada com a medição da evapotranspiração, o qual é um processo espontâneo na natureza.

Atualmente muitas pesquisas já foram desenvolvidas abordando estes dois temas, sendo que diversos modelos matemáticos de estimativa da evapotranspiração de referência já são consagrados na literatura, a mencionar Thornthwaite (1948), Penman-Monteith (1956), Camargo (1964), Hargreaves & Samani (1985) entre outros.

O mesmo pode ser afirmado quando se diz respeito às técnicas de construção e utilização de lisímetros.

Em um contexto geral torna-se praticamente impossível falar isoladamente do termo evapotranspiração considerando que este seja somente o processo de evaporação da água presente no solo ou em sua superfície atrelado ao processo de transpiração das plantas.

Para que esse fenômeno ocorra é necessário que haja uma complexa cadeia de reações, nos âmbitos físico, químico e biológico onde o sistema solo-água-planta-atmosfera atue de forma integrada.

Quanto ao termo evaporação, na meteorologia, levando-se em consideração termos puramente físicos, Varejão-Silva (2006) menciona que este termo é usado para designar a transferência de água para a atmosfera, sob a forma de vapor.

Também, definida por Pereira et al. (2002), a evaporação é a água que é evaporada de um terreno adjacente à cultura, de uma superfície de água ou da superfície das folhas quando molhadas por chuva ou irrigação, sem ser usada pela planta.

A transpiração é definida como a água que penetra pelas raízes das plantas, utilizada na construção dos tecidos ou emitida pelas folhas, e posteriormente é reintegrada à atmosfera. (CARVALHO et al. 2013)

A evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas. (SENTELHAS et al., 2007) Quanto ao processo de evapotranspiração, este é controlado por diversos fatores, dos quais mais se destacam:

- i) Fatores biológicos das plantas, principalmente suas características morfológicas (tipo de sistema radicular, número e localização dos estômatos nas folhas, tipo de folha, e porte) devendo-se ressaltar o estágio de desenvolvimento da cultura e se é uma espécie perene ou de ciclo curto;
- ii) Parâmetros físico-hídricos do solo, principalmente a disponibilidade hídrica do solo;
- iii) Demanda evaporativa do ambiente, dependente exclusivamente de parâmetros agrometeorológicos (temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ambiente);

A evapotranspiração envolve simultaneamente fluxos de massa e energia na forma de calor latente. Sendo assim, métodos de balanço de massa tal como nos lisímetros e métodos de balanço de energia como o encontrado na razão de Bowen, podem vir a ser utilizados para quantificar este atributo em campos cultivados com culturas agrícolas e/ou vegetação natural. (FLUMIGNAN & FARIA, 2009; CAMPECHE et al. 2011; SOUZA et al. 2011; SCHMIDT et al. 2013)

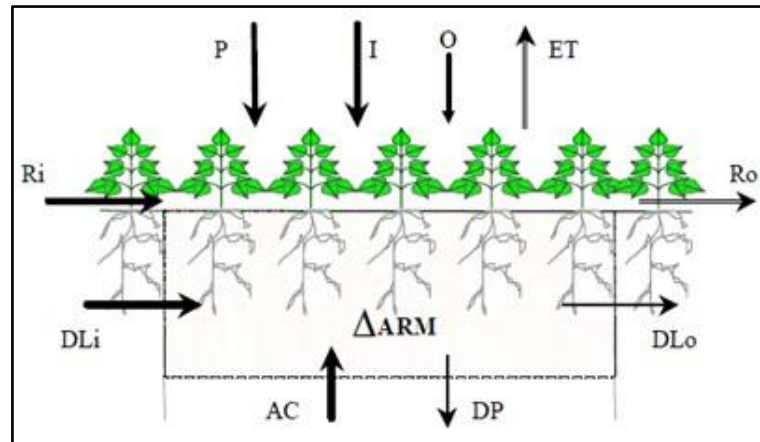
A estimativa da evapotranspiração por meio de equações matemáticas é o processo mais comum e mais usual de obtenção da perda de água em áreas vegetadas, assim, são necessários dados climático-fisiológicos para sua aplicação (BARROS et al. 2009).

Deve-se ressaltar que muitas vezes esses dados não estão disponíveis para o agricultor.

A evapotranspiração de referência é dita como a quantidade de água utilizada por uma extensa superfície vegetada, em crescimento ativo, livre de pragas e doenças, apresentando cobertura máxima do terreno com a umidade do solo nas condições ideais para o pleno desenvolvimento do sistema radicular. (DASTANE, 1976; ALLEN et al. 1998; SENTELHAS et al. 2007).

Neste tipo de estudo é de suma importância monitorar as entradas e as possíveis saídas de água do sistema do qual se está trabalhando. A figura 1, adaptada de Sentelhas et al. (2007), demonstra isto de forma detalhada:

Figura 1 – Desenho esquemático da variação do armazenamento de água no sistema solo-água-planta-atmosfera



Fonte: SENTELHAS et al. (2007, p. 92)

A precipitação (P), a irrigação (I), o orvalho (O), o escoamento superficial (*Run in*, Ri), a drenagem lateral (DLi) e a ascensão capilar (AC) são as possíveis entradas de água no sistema. A evapotranspiração (ET), o escoamento superficial (*Run off*, Ro), a drenagem lateral (DLo) e a drenagem profunda (DP) são as possíveis saídas de água no sistema.

Esse esquema é aplicável quando se efetuam trabalhos com utilização de equipamentos denominados lisímetros.

Existem basicamente três tipos de lisímetros: de pesagem, drenagem ou lençol freático constante. Esses equipamentos possuem seu funcionamento baseado no princípio de conservação de massa da água em um volume conhecido de solo. A lisimetria vem sendo desenvolvida e melhorada constantemente em função de que os dados obtidos a partir desta técnica são úteis para um melhor conhecimento do requerimento hídrico das culturas agrícolas ao longo de seu ciclo produtivo.

Auxilia, inclusive, em estudos de ajustes da estimativa da evapotranspiração de referência de uma dada localidade, pois, com estes equipamentos torna-se possível obter sua medida.

Diversos são os autores que se aprofundaram nesses estudos e promoveram o desenvolvimento destes equipamentos recebendo maior destaque, Thornthwaite (1948), Doorenbos & Pruitt (1977), Doorenbos & Kassam (1979), Wright (1982) e Allen et al. (1998). Um lisímetro e a técnica de seu uso são definidos como:

[...] um container de grande dimensão contendo solo onde plantas se desenvolvem; perdas e ganhos de água podem ser mensurados. O container é ajustado para sutis ganhos de água por irrigação e perdas por drenagem. Estes equipamentos são enterrados a campo e são rodeados pelo mesmo tipo de cultura da qual está em desenvolvimento dentro destes. O tamanho pode variar de um pequeno barril de óleo até tipos de maiores dimensões mais largos e profundos podendo, inclusive, ser de pesagem ou não. Nos lisímetros sem-pesagem, as mudanças volumétricas de água no sistema são medidas a cada uma ou duas semanas. Não é possível proceder com medidas diárias confiáveis. [...] Os lisímetros de pesagem podem gerar dados precisos na mudança de umidade do solo para períodos na partição horária e diária. Este outro tipo de equipamento é colocado dentro de outro tanque que fica em contato com o solo adjacente. O container de dentro fica livre para medições de pesagem em escala definida. (DASTANE, 1976, p. 21)

Atualmente os lisímetros de pesagem são dispositivos que, quando bem manejados, conseguem mensurar com grande precisão a evapotranspiração de um determinado ambiente.

Esse tipo de lisímetro pode ser feito com um sistema de regulação hidráulica, porém, hoje em dia, é feito de forma automatizada com um sistema eletrônico dependente de um microprocessador (*data logger*) ligado a sensores de pesagem, as células de carga. Este equipamento utiliza a medida automatizada de células de carga instaladas sob uma caixa impermeável, medindo a variação de peso (seu principal princípio).

Essa variação é totalmente atribuída à evapotranspiração desconsiderando-se a interferência da biomassa presente no sistema. (VAREJÃO-SILVA, 2006; SENTELHAS et al. 2007; CAMPECHE et al. 2011)

Em um contexto geral diversos são os fatores influentes na obtenção da medida da evapotranspiração perante o uso destes equipamentos, dos quais são divididos em aspectos ambientais e tecnológicos.

Schmidt et al. (2013) menciona que no caso de lisímetros de pesagem ajustes devem ser feitos na calibração do intervalo de sensibilidade das células de carga para que seja obtida uma correta variação de massa do sistema antes que a evapotranspiração seja realmente computada.

Esse mesmo autor menciona que após um determinado intervalo de tempo a quantidade de água coletada (em massa) pelo sistema de drenagem deve ser subtraída da variação total de massa. Precipitação intensa, aliados a vendavais devem ser considerados quando se estiver procedendo com uma análise lisimétrica. A vegetação circundante do equipamento (também chamada de zona tampão) deve ser representativa, o que minimiza o efeito “oásis” sobre as plantas.

Quanto ao aspecto construtivo o espaçamento das paredes externas e internas, a área evaporativa do tanque, a radiação e a advecção térmica, o regime da umidade do solo no seu interior, a espessura das paredes, a altura de suas bordas, altura e densidade da vegetação dentro e fora do equipamento sem dúvida são as maiores fontes de erros de interpretações de medidas lisimétricas. (CARVALHO et al. 2013; CAMPECHE et al. 2011)

A calibração e coleta de dados em um lisímetro de pesagem envolvem erros de medida, os quais são usados para qualificar os dados em análise.

Quatro tipos de erros de medidas são apontados na literatura: exatidão, precisão, sensibilidade e resolução, com definições confusas e, muitas vezes, usadas incorretamente. (CAMPECHE et al. 2011)

Apesar dessas considerações, um aspecto importante a ser mencionado é que a leitura em milivoltagem obtida pelo *data logger* apresenta uma escala que abrange até a quinta casa decimal.

Geralmente as variações dos números, quando se está fazendo a medição e leitura dos dados, podem ser trabalhadas na terceira e quarta casa decimal. Isto é indicativo de uma ótima precisão além da questão do intervalo curto de tempo de medida (sendo possível a cada cinco segundos).

O lisímetro de pesagem apresenta-se como o melhor equipamento para a medida acurada da evapotranspiração de referência, e serve como metodologia padrão para a calibração de equações para estimativa dessas variáveis. (ABOUKHALED et al. 1982; CARVALHO et al. 2013)

A grande limitação deste tipo de equipamento é o seu custo de aquisição que é relativamente alto devido aos sensores. A obtenção de dados e manutenção também deve receber atenção, pois, exige mão de obra especializada. O que torna a lisimetria um estudo limitado aos centros de pesquisas e universidades.

1. CAPÍTULO 1: CONSTRUÇÃO DE LISÍMETRO DE PESAGEM DE SEÇÃO CIRCULAR PARA A MEDIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0): SISTEMA COM TRÊS CÉLULAS DE CARGA

Daniel Gonçalves Gomes Jr., Alexandre Dal Pai, Enzo Dal Pai

1.1 RESUMO

A mensuração da evapotranspiração de uma determinada localidade é de suma importância para o uso racional da água nos sistemas agrícolas. Havendo esta medida, é possível quantificar com maior precisão o requerimento hídrico das culturas. Diante desta questão, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um lisímetro de pesagem, para medir a evapotranspiração de referência. Este equipamento é composto de uma estrutura de concreto armado em formato circular havendo neste um poço de visita, com um tanque de capacidade volumétrica de 1, 5 m³. O sistema de pesagem foi projetado por base de um tripé de sustentação reforçado com estrutura de aço-carbono com três células de carga afixadas. A drenagem do sistema foi mensurada pelo uso de um pluviômetro eletrônico. As informações das células de carga e do pluviômetro foram armazenadas pelo uso de um *datalogger* 21-X da *CampbellScientific*®. A manutenção da umidade do solo, quando na capacidade de campo, foi feita em função das leituras obtidas do *datalogger* em conjunto com uso de tensiômetros/vacuômetros instalados para uma profundidade de 0,2 m dentro e fora do tanque, na zona tampão, sendo estabelecido um turno de rega médio de três dias. A metodologia empregada na construção, montagem, automação e calibração apresentou-se adequada, obtendo-se coeficiente de determinação (R^2) de 0,9998.

Palavras-chave: Fluxo de água, irrigação, requerimento hídrico.

CONSTRUCTION OF A CIRCULAR SECTION WEIGHING LYSIMETER FOR THE MEASUREMENT OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION (ET_0): THREE LOAD CELL SYSTEM

Gomes Jr, D. G.; Dal Pai, A.; Dal Pai, E.

1.2 ABSTRACT

The evapotranspiration measurement from a certain locality receives great importance because of the rational usage of water in the agricultural systems. With this measure, it is possible to quantify with greater precision the crops water requirement. The main objective of this work was to develop a weighing lysimeter to measure reference evapotranspiration. This equipment is composed of concrete structure in circular format, having a visiting well with a tank of volumetric capacity of 1, 5 m³. The weighing system was designed on the basis of a reinforced support tripod with carbon steel frame with three load cells affixed. The system water drainage was measured using an electronic rain gauge. Load cell and rain gauge informations were stored using a *Campbell Scientific*[®] 21-X *datalogger*. The soil moisture maintenance, when in the field capacity, was done according to the readings obtained from the *datalogger* in conjunction with the usage of tensiometers / vacuometers installed to a depth of 0,2 m inside and outside of the tank, being established a three-day interval of irrigation. The methodology presented in this work and used in the construction, automation and calibration processes was adequate, obtaining a coefficient of determination (R^2) of 0,9998.

Key words: Irrigation, water flux, water requirement.

1.3 INTRODUÇÃO

A tecnologia está cada vez mais difundida dentro da agricultura hoje em dia e diversos são os sistemas de irrigação que podem ser utilizados. Cada sistema é dependente da disponibilidade hídrica do ambiente que virá a ser instalado, do tipo de solo e suas características físico-hídricas, da demanda evaporativa do ambiente e por último, da cultura e de sua demanda hídrica. Para se estabelecer uma boa prática de manejo da irrigação é de suma importância ter o conhecimento, inicialmente, da evapotranspiração de referência de um determinado ambiente de produção.

Basicamente e de acordo com Allen et al. (1998) a evapotranspiração é a combinação de dois processos separados, a transpiração e a evaporação.

De outro modo há a conceituação do termo evapotranspiração de referência dita como uma condição padrão. É considerada como a evapotranspiração de uma superfície gramada, livre de doenças ou pragas, sem deficiência nutricional e em um solo em plena capacidade hídrica (umidade volumétrica do solo na capacidade campo).

Há duas formas de se trabalhar com este parâmetro:

- i) Pelo uso de equações de estimativas, também considerado como método indireto;
- ii) Pelo uso da técnica de lisimetria, com o manejo de equipamentos denominados lisímetros, também considerado como método direto;

O termo lisímetro deriva do grego *lysis*, que quer dizer dissolução ou movimento, e *metron*, que significa mensurar ou medir. Sendo assim, estes equipamentos possuem a capacidade de medir o movimento da água no solo. Há diversos tipos de lisímetros sendo os mais conhecidos: de drenagem, de pesagem e de nível de lençol freático constante. O lisímetro de drenagem apresenta um aspecto diferencial sendo um dos melhores equipamentos para medir o fluxo de água no sentido vertical descendente.

Sua medida é fundamentalmente dependente da infiltração da água no solo e da própria condutividade hidráulica no solo.

Já o lisímetro de pesagem é muito útil por medir de forma acurada a evapotranspiração de referência de uma dada localidade, ainda mais devido às inovações tecnológicas que, atualmente, devido ao uso de sensores eletrônicos garantem medidas em curta escala de tempo.

Os lisímetros de pesagem são recipientes preenchidos com solo, onde as culturas são cultivadas em condições de campo, para medir a quantidade de água perdida por evaporação e transpiração. Segundo Puppo & García-Petillo (2010) os lisímetros de pesagem servem para medir a evapotranspiração durante intervalos curtos de tempo (partição horária e diária geralmente), e são medidas pontuais.

No campo, em condições reais de cultivo, a quantidade de água evapotranspirada é obtida por meio do balanço entre a água que entrou no sistema, seja por precipitação ou por irrigação e a água que saiu, através da evaporação, transpiração e também drenagem profunda.

Apesar de exigir a implantação de uma estrutura física muitas vezes onerosa, Barros et al. (2009) menciona que a obtenção de dados de evapotranspiração por meio da lisimetria permite o planejamento mais confiável da agricultura irrigada, possibilitando o uso racional da água.

O principal objetivo deste trabalho é construir um lisímetro de pesagem de seção circular para medir a evapotranspiração de referência para a cidade de Botucatu-SP. Seu objetivo específico é:

- i) Avaliar a eficácia do uso do equipamento construído;

1.4 MATERIAL E MÉTODOS

1.4.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi realizado na Estação Evapotranspirométrica do Departamento de Bioprocessos da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” presente na cidade de Botucatu-SP (22°50' S; 48°25' W e altitude média de 786 m). De acordo com Escobedo et al. (2011) o clima desta localidade é temperado quente (mesotérmico), com verão quente e úmido e inverno seco.

Esta estação está presente em uma área com largura de 15 m e comprimento de 25 m (área aproximada de 375 m²) e possui sua superfície vegetada coberta por grama Batatais (*Paspalum notatum*) espécie vegetal que também foi inserida dentro do tanque.

A construção do equipamento ocorreu no período de dezembro de 2015 a outubro de 2016 sendo dividido em duas partes. A primeira parte (dezembro de 2015 a abril de 2016) relativa à amostragem e caracterização física do solo e a segunda parte (maio a outubro de 2016) foi àquela onde se construiu o equipamento propriamente dito. Um período de aquisição e análise de dados foi feito para avaliar a viabilidade de uso do equipamento que ocorreu durante os meses de março e abril de 2017. O solo presente na estação e que também foi colocado dentro do tanque é classificado, segundo Jesus, W.R (2000), como latossolo roxo distrófico e o terreno apresenta uma declividade de 2%.

1.4.2 Análise do perfil do solo

1.4.2.1 Amostragem do perfil do solo

Na lisimetria é de suma importância que as características físicas do solo dentro do tanque sejam iguais ou muito próximas daquelas presentes no solo imediatamente fora deste.

Essa etapa do projeto ocorreu no período de 01/12/2015 a 01/04/2016. Como forma de garantia para manter as características físicas do perfil do solo, correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular, optou-se proceder com as seguintes condições de contorno:

- i) Entalhar blocos de solo;
- ii) Garantir trabalhar na profundidade entre 0 – 0,45 m;
- iii) Admitir a profundidade efetiva do sistema radicular para este projeto dentro de um intervalo de 0,30 – 0,40 m;

Inicialmente, foi delimitada uma área de formato quadrado (2 x 2 m de largura e comprimento respectivamente). Esta área utilizada, de 4 m², foi feita de tal forma a ser ligeiramente superior ao diâmetro e, conseqüentemente, da área do container do lisímetro.

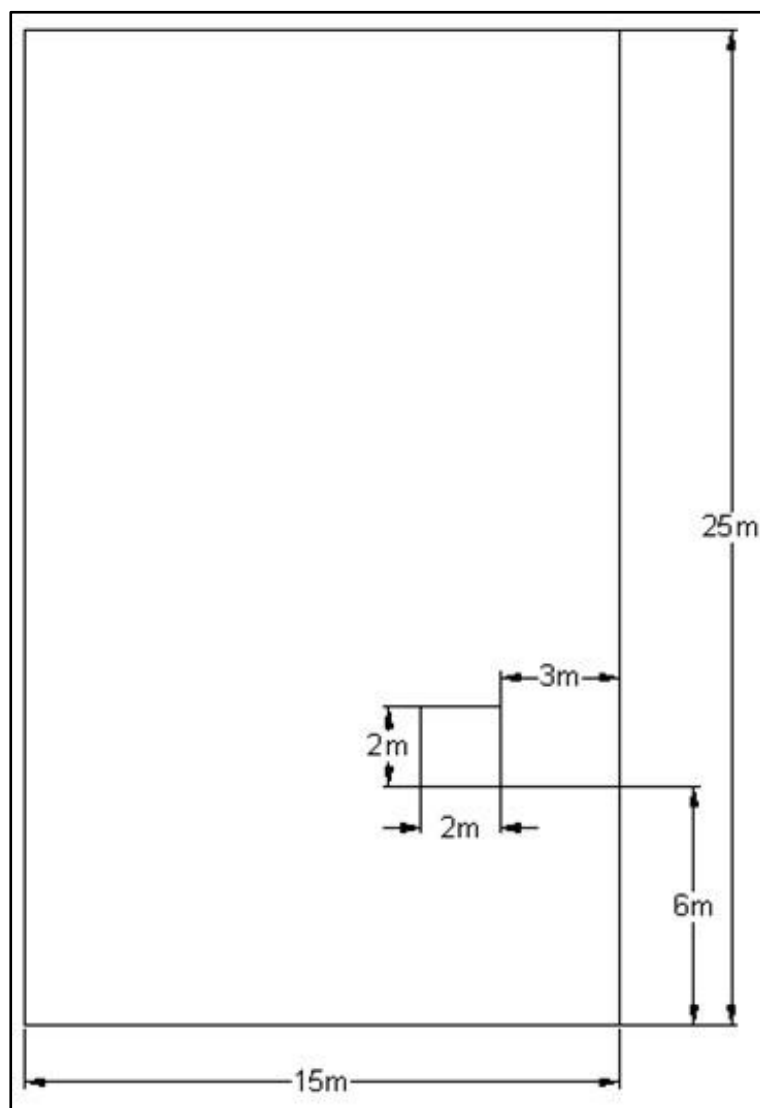
Neste mesmo local foram coletadas todas as amostras de solo (ANEXO - Imagens das etapas do projeto) utilizadas no experimento, procedimentos que serão discutidos mais adiante no texto. Durante a retirada dos blocos de solo, a área de amostragem ficou permanentemente coberta com lona. Essa medida foi tomada com os seguintes objetivos:

- i) Manter a umidade do solo para facilitar o manejo das amostras entalhadas;
- ii) Evitar a saturação do solo por umidade devido ao excesso de precipitação;
- iii) Evitar ressecamento excessivo do solo devido exposição à radiação solar;

Por mais complicado que pareça ser esta época do ano foi a mais favorável para entalhar os blocos, pois, as chuvas acabaram por oferecer umidade ao solo por infiltração lateral.

Por ser um processo de redistribuição de água, o solo na área amostral não ficava com teores elevados de umidade apresentando um estado de friabilidade favorável ao manejo. A figura 2 mostra a posição do local de amostragem em relação à área total da estação como um todo:

Figura 2 – Área da estação evapotranspirométrica e local de amostragem de solo e construção do lisímetro



A área de amostragem foi delimitada de tal forma que, depois de construída a estrutura de alvenaria, o equipamento como um todo ficou com uma zona tampão, de, no mínimo, 3 m ao seu redor. Quanto aos blocos, estes apresentam dimensões variáveis. Uma estratificação foi feita em função da seguinte padronização, apresentada no quadro 1:

Quadro 1 – Camadas representativas de amostragem e principais características dos blocos utilizados para recompor o perfil do solo

Camada representativa	Características do material
0 – 0,10 m	Blocos quadrado-retangulares. Bem estruturados, com forte presença de sistema radicular, dimensões: Altura: 0,10 m Largura: 0,10 a 0,12 m Comprimento: 0,10 a 0,12 m
0,10 – 0,20 m	Blocos quadrado-retangulares, estrutura frágil, média a pouca presença de sistema radicular. Estruturado mais em função da porosidade natural do que do sistema radicular, dimensões: Altura: 0,10 m Largura: 0,10 a 0,12 m Comprimento: 0,10 a 0,12 m
0,20 – 0,35 m	Amostras de tamanhos variados, raramente blocos bem definidos. Estrutura geralmente laminar com elevado grau de compactação e tendência de formação de trincas e rachaduras.

Os blocos de solo foram guardados em caixotes de madeira (ANEXO - Imagens das etapas do projeto) com dimensões de 1 x 1 x 0,2 m de largura, comprimento e altura respectivamente. Estes blocos foram organizados de forma ordenada no sentido que eram retirados. Permaneceram em local seco e arejado e ficaram armazenados até o devido momento de sua utilização.

1.4.2.2 Análise física e química do solo

Algumas amostragens de solo foram procedidas, inicialmente, para se ter o conhecimento de seus parâmetros físicos, que serão de fundamental importância para a avaliação do comportamento da água, no que diz respeito ao estado hídrico ótimo para o desenvolvimento da cultura. Além disso, havendo o conhecimento destes parâmetros, tornou-se possível fazer uma comparação da variação de seus valores depois de recomposto o perfil do solo.

Nos períodos de junho e julho de 2015, amostras indeformadas em anéis de *kopeck*, em triplicata, foram retiradas do perfil do solo em profundidades variadas (0 – 0,15 m; 0,15 – 0,30 m; 0,30 – 0,45 m) para a determinação da densidade e umidade volumétrica (inicialmente de saturação e capacidade de campo) do solo da área de estudo. Além disso, e de forma conjunta, foram retiradas amostras de solo e submetidas à secagem ao ar (terra fina seca ao ar – T.F.S.A). Estas amostras de terra fina seca ao ar foram utilizadas para a determinação da análise granulométrica e/ou textura do solo e a amostragem foi procedida do perfil inicial do solo. Já para a análise da densidade da partícula foram retiradas amostras representativas das profundidades de 0 – 0,15 m; 0,15 – 0,30 m; 0,30 – 0,45 m, o que garantiu o cálculo da porosidade total do solo e sua variação ao longo do perfil.

Foram retiradas amostras indeformadas em anéis de *kopeck* (ANEXO - Imagens das etapas do projeto), em triplicata, do perfil do solo em profundidades variadas (0,10 m – 0,20 m – 0,30 m) para a determinação da umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente. Os dados de umidade volumétrica do solo foram de suma importância, pois permitiram o cálculo da disponibilidade total de água do solo utilizada no experimento. No início do mês de abril de 2016, antes de dar entrada aos procedimentos construtivos do equipamento como um todo, amostras de solo foram retiradas para análise de química e fertilidade. Retiradas com trado de rosca na profundidade de 0,20 m estas amostras foram secas ao ar e encaminhadas ao laboratório para análise.

A última amostra procedida foi a da umidade gravimétrica do solo. Amostras de solo foram retiradas no período de outubro de 2016 quando o tanque tinha o perfil do solo recomposto. Secas em estufa por 48 h, seus valores foram utilizados para proceder com comparações na fase de calibração.

Quanto a estas amostragens, importantes comentários devem ser feitos. Primeiramente todas estas análises foram feitas no Laboratório de Física do Solo da UNESP de Botucatu-SP. A metodologia empregada é baseada naquela descrita pela EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – em seu Manual de Métodos de Análises de Solo (1997).

A umidade volumétrica do solo na capacidade de campo foi obtida pelo método da mesa de tensão, por apresentar dados mais confiáveis se comparado com o método do Extrator de Richards.

A densidade da partícula do solo foi feita pelo método do balão volumétrico. A porosidade total do solo foi determinada em função da umidade volumétrica do solo em condição de saturação. Porém, ela também, pode ser determinada em função da relação existente entre a densidade do solo e a densidade da partícula.

1.4.3 Aspectos construtivos do equipamento

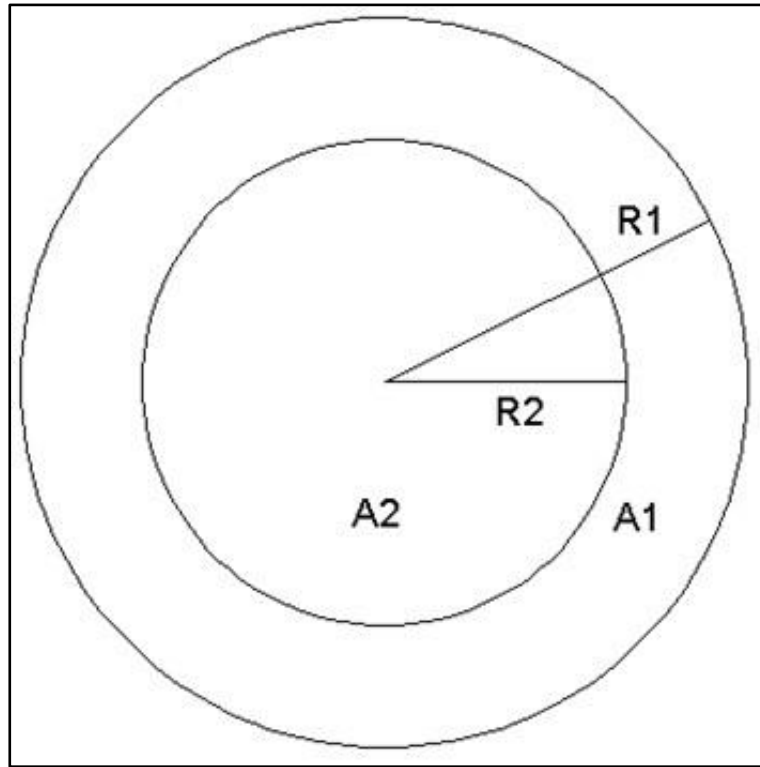
1.4.3.1 Fundamentos matemáticos: Estrutura e pontos de inserção das células de carga

Inicialmente, a construção do lisímetro neste trabalho dependeu, fundamentalmente, de dois parâmetros:

- i) Pontos de inserção das células de carga;
- ii) Medidas do tanque;

Este equipamento possui uma estrutura de pesagem composta de três células de carga e foi planejado de tal forma para que haja uma distribuição uniforme do peso sobre estes sensores. Os três pontos de fixação dos sensores foram planejados de tal forma que a variação angular entre eles seja de 120° , o que garantiu a formação de um triângulo equilátero e, tornou possível fazer uma estrutura neste mesmo formato. De grande importância optou-se pelo tanque ser circular para este procedimento. Um ajuste matemático de relação de áreas foi procedido para se encontrar os pontos de inserção das células. Este ajuste foi possível de ser feito a partir do conhecimento da área da base do tanque, principalmente de seu diâmetro. Uma vez tendo o conhecimento deste diâmetro e, consecutivamente do raio da base, foi possível de se obter um segundo raio de ajuste que possibilitou, a partir de um círculo inscrito, encontrar os pontos de inserção das células de carga. O desenho esquemático a seguir, ilustra esse procedimento de forma mais clara. A dedução matemática segue logo abaixo do mesmo:

Figura 3 – Relação de áreas de círculos



$$A_1 = \pi \cdot R_1^2 \quad (1)$$

$$A_2 = \pi \cdot R_2^2 \quad (2)$$

$$A_2 = A_1/2 \quad (3)$$

Logo:

$$\pi R_2^2 = \pi R_1^2/2 \quad (4)$$

$$R_2 = \sqrt{R_1^2/2} \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{R_1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

O raio do círculo a ser traçado para encontrar os pontos de inserção das células de carga é encontrado pela seguinte expressão:

$$R_2 = R_1 \sqrt{2} / 2 \quad (7)$$

$$R_2 = 0,707.R_1 \quad (8)$$

Onde: R_2 é o raio utilizado para traçar o círculo de ponto de inserção das sapatas; R_1 é o raio da base do tanque;

A estrutura do equipamento construída em concreto armado possui seus aspectos construtivos dependentes dos mais variados fatores. O conhecimento da largura do tijolo recebe importância, pois, definirá a largura da parede do equipamento e com isso, a distância existente entre a superfície evaporativa dentro do tanque e aquela imediatamente fora do tanque, na zona tampão.

A altura do tanque, conjuntamente com a própria altura da célula de carga e a altura do pilar de sustentação definem a altura da parede como um todo e, com isso, do espaço existente abaixo do tanque para possíveis manutenções. Deve-se lembrar que o projeto como um todo depende da escavação do local aonde o equipamento será construído e que os muros são basicamente de arrimo.

A largura do poço de visitação e seu comprimento também são fatores importantes nos cálculos, pois, devem-se considerar condições confortáveis para visitação, além de segurança de acesso. Tudo isso deve ser planejado procurando propiciar o mínimo de interferência nas medidas a serem obtidas.

O equacionamento destes parâmetros construtivos utilizados no projeto será mostrado a seguir:

$$D_{TOTAL} = D_{SUPERIOR} + (2.E) + (2.L) \quad (9)$$

Onde: D_{TOTAL} é o diâmetro total da estrutura de alvenaria; $D_{SUPERIOR}$ é o diâmetro do bocal do tanque; E é o espaço (ou vão) existente entre a borda lateral externa do tanque e a superfície interna da alvenaria; L é a largura da parede de alvenaria, ou seja, a largura do tijolo utilizado;

Em relação ao tanque era importante que a borda lateral dele não ficasse muito distante da parede interna da estrutura de alvenaria. Esta medida foi calculada da seguinte forma:

$$D_{INTERNO} = D_{SUPERIOR} + (2 \cdot E) \quad (10)$$

Onde: $D_{INTERNO}$ é o diâmetro interno da estrutura de alvenaria;

O comprimento total da estrutura é dependente do comprimento do poço de visita e pode ser estimado a partir da seguinte equação apresentada a seguir:

$$C_{TOTAL} = [C_{POÇO} + (1 \cdot C_{TIJOLO})] + D_{TOTAL} \quad (11)$$

Onde: C_{TOTAL} é o comprimento total da estrutura de alvenaria; $C_{POÇO}$ é o comprimento do poço de visita; C_{TIJOLO} é o comprimento do tijolo nos vértices da estrutura do poço de visita;

A altura total da estrutura foi planejada em função da seguinte equação apresentada a seguir:

$$H_{TOTAL} = h_{TANQUE} + h_{CHAPA} + h_{CÉLULA} + h_{FIXAÇÃO DA CÉLULA} + h_{PILAR} \quad (12)$$

Onde: h_{TANQUE} é a altura do tanque onde a grama está inserida; h_{CHAPA} é a espessura da chapa de sustentação que vai logo abaixo do tanque; $h_{CÉLULA}$ é a altura da célula de carga; $h_{FIXAÇÃO DA CÉLULA}$ é a altura da chapa de fixação soldada na base da célula de carga e acoplada no bocal do pilar de sustentação; h_{PILAR} é a altura do pilar de sustentação;

Na literatura, diversos autores mencionam que não se deve fazer uma parede muito espessa para este tipo de equipamento, pois, quanto maior for a distância entre a superfície evaporativa interna com relação à externa maiores serão as interferências por efeito de advecção térmica. Normalmente são considerados larguras de 0,10 a 0,15 m que é a largura de um tijolo de alvenaria. Neste projeto foram utilizados blocos de concreto com largura ligeiramente superior (0,18 a 0,20 m). Há também a questão da distância da borda lateral externa do tanque em relação à parede interna da estrutura de alvenaria que deve ficar entre valores da faixa de 0,05 m a 0,10 m. Normalmente essa diferença acaba tendo uma pequena redução de seus valores (0,03 a 0,08 m) já que ocorre dilatação das bordas laterais do tanque após o solo ter sido acomodado em seu interior.

O quadro 2 representa as principais medidas utilizadas como ponto de partida para a execução da planta baixa do projeto:

Quadro 2 – Material e suas medidas utilizadas como ponto de partida para a execução da planta baixa do projeto

Material	Medidas
Tanque de PVC	Altura: 0,79 m Diâmetro do bocal: 1,8 m Diâmetro da base: 1,50 m
Anel de Aço 1020	Espessura: 0,00635 m Diâmetro: 1,5 m
Célula de Carga – SamelL-2T (2 mV/V $\pm$ 0,1%)	Altura: 0,135 m
Chapa de Ferro p/ sustentação da célula de carga	Diâmetro: 0,20 m Espessura: 0,015m
Pilar de sustentação Ø 6pol	Diâmetro: 0,152 m Altura: 1m
Bloco de concreto Classe B; M – 20	Altura: 0,190 m Largura: 0,190 m Comprimento: 0,190 m

Ajustes foram feitos à medida que a estrutura de alvenaria estava sendo construída. A planta baixa do projeto serve como um ponto de partida, uma referência daquilo que está sendo idealizado.

Arredondamentos em escala milimétrica de algumas medidas foram procedidos, por exemplo, no caso do anel de aço de sustentação do tanque. Sua espessura medida foi de 0,00635 m (6,35 mm) só que nos cálculos optou-se por arredondar para 0,007m (7mm).

Outro aspecto importante é que o piso da estrutura possui um pequeno declive. Não interferindo no aprumo da estrutura como um todo, este declive serve para o direcionamento do escoamento da água proveniente da precipitação e daquela que é drenada no fundo do tanque, já que este possui uma válvula para esta função.

Esta água escoar de forma direcionada para uma área de drenagem feita logo abaixo da escada de acesso. Esta área de drenagem é constituída de uma broca de 10" de diâmetro e 1,5 m de profundidade preenchida com brita nº 1 para facilitar o escoamento da água.

As figuras 4, 5 e 6 mostram a planta baixa do projeto:

Figura 4 – Desenho esquemático da estrutura de alvenaria do lisímetro de pesagem, vista superior

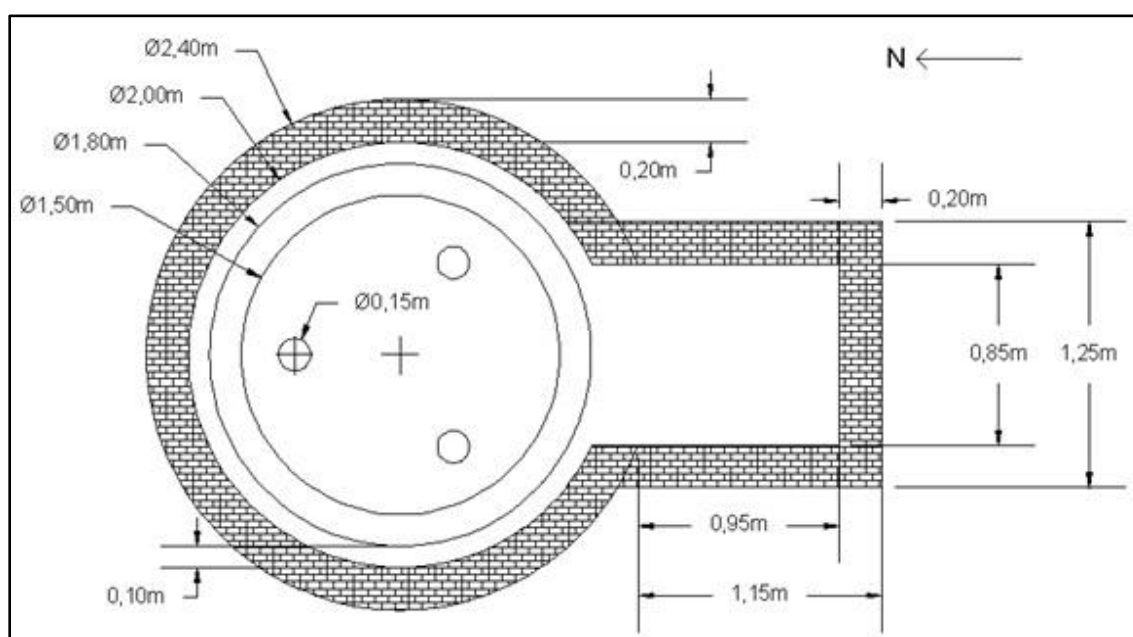


Figura 5 – Desenho esquemático dos pontos de inserção das células de carga do lisímetro, vista superior

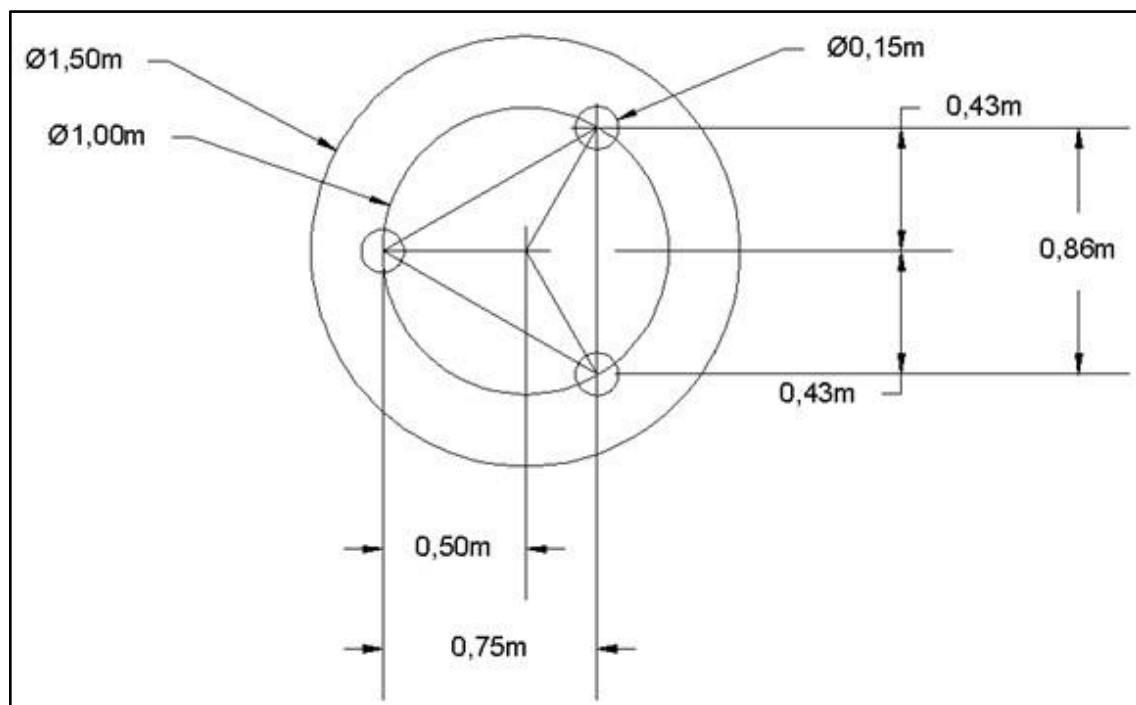
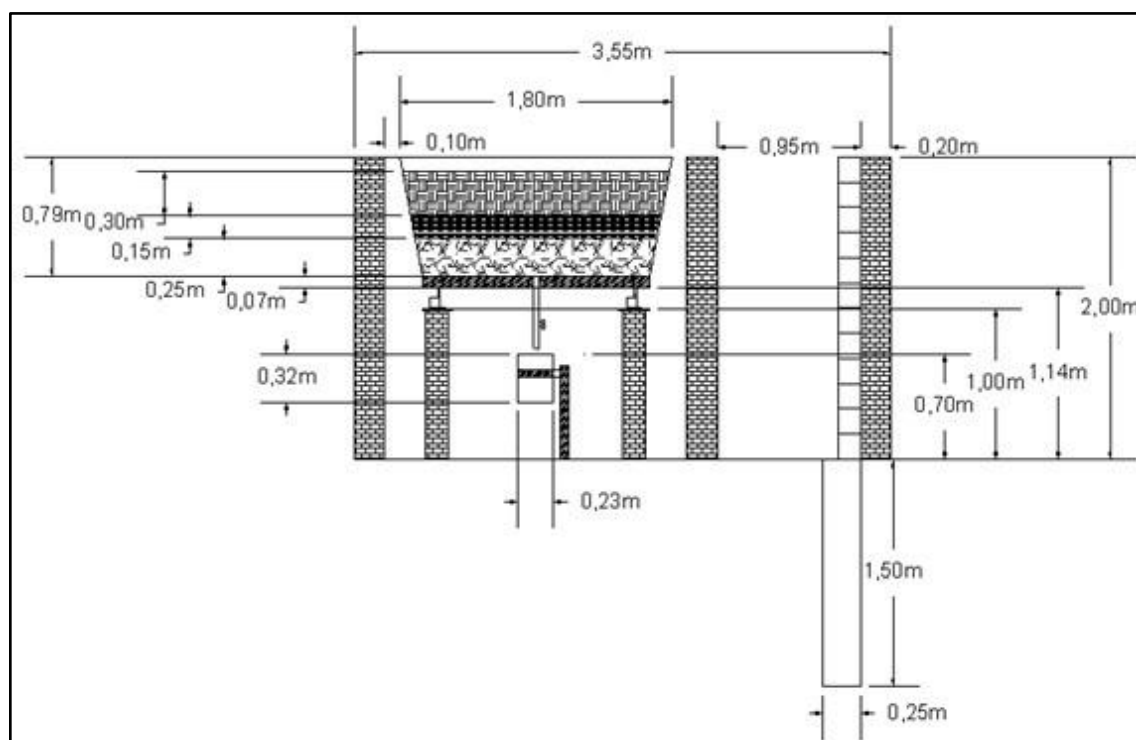


Figura 6 – Desenho esquemático da estrutura de alvenaria do lisímetro de pesagem, vista frontal



A parte inferior, onde é possível de se fazer visitas, ficou com uma altura aproximada de 1,15 m da qual se apresentou suficientemente adequada para proceder com ajustes e manutenção.

No topo da estrutura, acima do nível do solo, uma pequena borda de 0,05 m foi deixada para impedir entrada de água por escoamento superficial. Na figura 6, é possível observar o sistema de drenagem.

Logo acima das células de carga há a chapa de aço-carbono utilizada como base de sustentação para o tanque, esta chapa, possui o mesmo diâmetro da base do tanque e em seu centro há um corte circular com diâmetro de 0,080 m. Uma flange (diâmetro interno de 0,032 m) foi inserida no fundo do tanque e possui um cano de PVC acoplado a um registro de esfera de mesmo material.

Por último, os pilares de sustentação são de concreto armado e possuem formato circular (ANEXO - Imagens das etapas do projeto). Uma estrutura composta de chapas “W” de aço-carbono foi acoplada ao redor destes pilares com largura ligeiramente superior ao seu diâmetro. Soldadas às chapas de ferro de sustentação das células de carga, presente no bocal dos pilares, essa estrutura metálica possui a função de distribuir uniformemente o peso e reforçar a capacidade de sustentação do tanque como um todo.

1.4.3.2 Aquisição de dados e sensores

Para a aquisição de dados foi utilizado um *datalogger* 21-X da *Campbell Scientific*[®], com intervalo de leitura do sinal emitido das células de carga a cada 5 segundos.

O sistema de pesagem é composto de três células de carga da marca Samel L-2T ($2 \text{ mV/V} \pm 0,1\%$) com capacidade nominal de carga de 2 ton cada. O sistema como um todo possui capacidade para suportar até 6 ton. Como cada célula possui uma voltagem nominal de $2 \text{ mV/V} \pm 0,1\%$ então a leitura máxima de cada uma poderia ser de $2,2 \text{ mV/V}$. Portanto, em escala de milivoltagem a leitura esperada, quando o solo estiver saturado num dia de intensa precipitação, é de estar na faixa $0,733 \pm 0,1\%$. As células foram testadas, inicialmente, para ver se possuíam sinais de leitura positivos e semelhantes.

Neste tipo de equipamento não se deve trabalhar em sua carga máxima, sendo recomendado trabalhar em um intervalo de 75% de sua capacidade para que se tenha uma boa leitura e menores influências de problemas de sobrecarga e com histerese. Portanto, o limite máximo de carga recomendado é de 4,5 ton que é aquele dentro da margem ideal de leitura. Valores maiores não seriam recomendados.

Dois pluviômetros eletrônicos da marca *Texas Electronics*[®] modelo TR-525M foram utilizados, um instalado em um pedestal presente na superfície gramada, próximo ao lisímetro para a medida da precipitação, e outro instalado logo abaixo do tanque, utilizado para medir o excedente de água drenado. Como a superfície evaporativa presente no tanque possui um área aproximada de 2,01 m² (diâmetro de 1,6m) e a área de captação do pluviômetro é de 0,047 m² (diâmetro de 0,254 m) a relação entre áreas é de 1:43, aproximadamente.

1.4.4 Recomposição do perfil do solo

A recomposição do perfil do solo foi procedida de forma conjunta com testes iniciais de calibração do equipamento (ANEXO - Imagens das etapas do projeto).

Antes de ajustar o tanque sobre as células de carga foi feita a pesagem da chapa de aço carbono. Havendo o conhecimento de sua massa, esta foi ajustada sobre as células e um primeiro teste de calibração foi feito.

Foi utilizado o procedimento do método de pares de entrada-saída de medidas de variação de peso pelas células de carga no sistema (JIA et al. 2006; CAMPECHE et al. 2011; CARVALHO et al. 2013; SCHMIDT et al. 2013), que consiste no uso de “massas-padrão”.

São sacos de brita nº 1 com densidade conhecida e massa conhecida.

Cada saco possui uma massa conhecida que tem equivalência igual a um determinado volume de água (em milímetros) que viria a ser inserido no sistema como um todo.

Pelo conhecimento da leitura via célula de carga de entrada e saída desse volume/massa conhecido pode-se estabelecer graficamente via regressão linear a curva e a equação de calibração do equipamento.

Foram utilizados para pesagem 10 sacos de ráfia com massa conhecida de 15 kg havendo em seu interior brita nº 1. Foram pesados um a um com uma massa total de 150 kg.

Com isso definiu-se uma primeira curva de calibração e uma primeira equação de regressão linear. Utilizada inicialmente para proceder com uma programação no *datalogger* que viesse a garantir saber a massa do sistema, além de ter garantia de uma correta leitura das células de carga.

Previamente a adição do solo no tanque e sabendo-se a massa inicial do sistema (chapa + tanque) um teste com adição de volumes conhecidos água foi feito. Este teste foi feito para avaliar a capacidade de suporte de carga da estrutura como um todo sendo incluso a parte do sistema de pesagem e eletrônico.

Alturas foram pré-definidas dentro do tanque. Sabendo-se o volume de água colocado e a altura da coluna de água correspondente, por simples conversão matemática é possível determinar o diâmetro interno do tanque para volumes conhecidos.

O procedimento matemático para o cálculo do diâmetro será apresentado a seguir:

$$d_{TANQUE} = \sqrt{\left[\left(\frac{4}{\pi} \right) \cdot \left(\frac{V_{TANQUE}}{h_{TANQUE}} \right) \right]} \quad (13)$$

Onde: V_{TANQUE} é o volume do tanque onde a grama está inserida; h_{TANQUE} a profundidade do tanque e/ou altura de coluna da água dentro deste;

Foram adicionados inicialmente 363 L de água para uma pequena aferição, logo em seguida 632 L, 750 L e por último completou-se o volume de 1000 L (1 m³). As alturas estipuladas foram confirmadas para o volume adicionado e foi possível testar a capacidade de leitura dos sensores. Os diâmetros puderam ser estimados com precisão. Uma vez completado o volume de 1 m³ e havido determinado o diâmetro interno (1,46 m aproximadamente) e a altura da coluna de água (0,6 m aproximadamente) dentro do tanque uma segunda calibração foi realizada.

Sabendo-se a milivoltagem inicial do sistema definiu-se o ponto zero e volumes medidos em proveta foram definidos com a relação de área já ajustada (área aproximada de 1,7 m², portanto 1 mm é igual a 1,7 L).

Sendo assim a quantidade de água em milímetros colocada no sistema foi de séries crescentes de 2 e 5 mm. Este pequeno teste foi feito para uma capacidade menor, sendo considerado um total de 35 mm aproximadamente. Este pequeno valor em escala milimétrica, correspondente na realidade a 59,5 L de água, foi utilizado para testar a sensibilidade do sensor a pequenas variações de massa que são possíveis de ocorrer. Em nível de comparação três repetições foram feitas, havendo a obtenção de três pares de entrada. Uma nova curva de calibração foi obtida. Mais bem ajustada a real situação, esta nova equação foi utilizada para quantificar a massa de solo inserida dentro do tanque. A reestruturação em si, foi feita da seguinte forma apresentada no quadro a seguir:

Quadro 3 – Metodologia aplicada para reestruturação do perfil do solo

Camada representativa	Material	Especificações
1ª Camada (Fundo do Tanque)	Brita nº1	1º Inserida uma camada inicial de brita até o bocal superior da flange do sistema de drenagem; 2º Adicionada primeira manta de drenagem do tipo bidim; 3º Adicionada nova camada de brita, altura máxima de camada de brita colocada h= 0,25 m; 4º Por último foi adicionada manta de drenagem do tipo bidim, como interface solo/brita;
2ª Camada	Solo desestruturado	1º O solo adicionado possui características correspondentes do perfil de interesse; 2º O solo adicionado foi peneirado com peneira de malha de 5mm; 3º Este solo foi levemente compactado e foi adicionada uma camada de h=0,15m deste material;

Continuação quadro 3:

3ª Camada	Solo estruturado (Blocos entalhados)	1º Adicionado em ordem inversa de quando retirado na fase de amostragem; 2º Foi adicionada uma camada de $h = 0,10$ m do solo retirado em profundidade, chamado aqui de camada Z_3; 3º Foi adicionada uma camada de $h = 0,10$ m do solo retirado da zona intermediária, chamado aqui de camada Z_2; 4º Foi adicionada uma camada de $h = 0,10$ m do solo retirado da zona superficial, chamado aqui de Z_1;
-----------	---	--

Por uma relação de massa e volume a densidade da brita e de solo foi obtida à medida que o perfil do solo era reestruturado.

Deve-se ressaltar que quando colocados os blocos entalhados foi necessário adicionar uma pequena camada de solo peneirado na interface entre perfis. Isso foi feito por dois motivos:

- i) Para nivelar o solo dentro do tanque;
- ii) Para que este solo peneirado, no momento de reestruturação do material como um todo, atue como agente cimentante dos blocos.

O perfil do solo possui uma profundidade máxima de 0,5 m e de uma forma geral, a profundidade efetiva do sistema radicular ficou inserida em uma camada representativa de solo de profundidade (z) de 0,30 m podendo-se admitir uma margem para mais de 0,05 m. Feito este procedimento foi feita a calibração do equipamento.

Por último foram adicionados os tapetes de grama no tanque e deixada uma borda livre de 0,05m entre o bocal do tanque em relação ao copado da cultura.

1.4.5 Cálculo da água disponível no solo

A água disponível do solo para este equipamento foi calculada, inicialmente, para o perfil total de solo (profundidade de 0,5 m). Sendo que uma análise comparativa foi realizada levando-se em consideração a quantidade de água disponível na profundidade efetiva do sistema radicular.

Estes dois parâmetros foram utilizados para estabelecer um intervalo ótimo de água disponível no solo e a ser adicionado ao sistema quando utilizada a irrigação.

Para a determinação da água disponível na profundidade efetiva do sistema radicular é necessário ter o conhecimento do tipo de cultura e o fator de disponibilidade de água a ela em função da demanda atmosférica da localidade de estudo. Esta demanda atmosférica é baseada no conhecimento da evapotranspiração de uma dada localidade. Para este experimento foi utilizada como forma de ajuste a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite (1948) em função de dados da normal climatológica de temperatura para ser possível a obtenção do fator de disponibilidade de água no solo.

A estimativa da evapotranspiração de referência foi feita em escala mensal e a partir destes valores foi possível encontrar a média anual em mm/dia.

O modelo de estimativa utilizado, segundo Sentelhas et al. (2007) é apresentado a seguir:

$$ET_0 = 16 \cdot (10 T_n/I)^a \text{ para: } 0 \leq T_n \leq 26,5^\circ\text{C} \quad (14)$$

$$ET_0 = -415,85 + 32,24 T_n - 0,43 T_n^2 \text{ para } T_n > 26,5^\circ\text{C} \quad (15)$$

Onde: ET_0 (mm/mês): evapotranspiração de referência; T_n ($^\circ\text{C}$): temperatura média do mês (n); a é um coeficiente de ajuste dependente do índice I ; I é um índice que expressa o nível de calor disponível na região onde n é o mês ($n = 1$ para janeiro, $n = 2$ para fevereiro... $n = 12$ para dezembro).

O valor de I depende do ritmo anual da temperatura, integrando o efeito térmico de cada mês, calculado pela fórmula:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2T_n)^{1,514} \quad (16)$$

O coeficiente de ajuste a:

$$a = 6,75.10^{-7}I^3 - 7,71.10^{-5}I^2 + 1,7912.10^{-2}I + 0,49239 \quad (17)$$

O valor estimado, inicialmente obtido, pelas equações anteriormente descritas é para condições decorrentes em um mês padrão de 30 dias e com 12 horas de fotoperíodo.

Sentelhas et al. (2007) menciona que uma correção pode ser feita quando se deseja trabalhar com períodos maiores ou menores que 30 dias e com fotoperíodos maiores ou menores que 12 horas.

Sendo assim a correção necessária a ser feita é apresentada nas seguintes equações:

$$ET_0 = ET_0.Cor \quad (18)$$

$$Cor = (ND/30).(N/12) \quad (19)$$

Onde: *Cor* é um fator de correção dependente do número de dias (ND) do mês em questão; N é o fotoperíodo, neste caso, do 15º dia de cada mês;

O fator de disponibilidade de água no solo varia entre 0,2 e 0,8 os valores menores são usados em culturas mais sensíveis ao déficit hídrico, e os maiores, nas culturas mais resistentes. (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2013, p.30)

Segundo Albuquerque e Durães (2008, p.133) este fator é uma fração da capacidade total de água disponível no solo que pode ser exaurida antes que ocorra o estresse por déficit hídrico, seus valores são em escala decimal (intervalo 0 a 1).

Podendo ser encontrado de duas formas ele é utilizado para o cálculo da capacidade real de água no solo.

A primeira forma de se obter o fator de disponibilidade é pelo uso de uma equação de ajuste, apresentada por Allen et al. (1998) no manual da FAO – 56:

$$f = f_{\text{tabelado}} + 0,04 \cdot (5 - ET_c) \quad (20)$$

Onde: f é o fator de disponibilidade de água no solo (decimal); ET_c é a evapotranspiração de cultura (mm/dia);

Na equação 20 o termo f_{tabelado} é disponível para diversas culturas (tabela 22, pág. 163 – 165, manual da FAO – 56 cap. 8).

Neste trabalho o termo ET_c foi comparado à média anual em milímetros por dia da evapotranspiração de referência estimada para o local de estudo em questão. Assumindo-se a relação $ET_c \sim ET_{\text{Oestimado}}$, utilizou-se a seguinte expressão como forma de ajuste do fator de disponibilidade de água no solo:

$$f = f_{\text{tabelado}} + 0,04 \cdot (5 - ET_{\text{Oestimado}}) \quad (21)$$

Onde: $ET_{\text{Oestimado}}$ é a média anual em mm/dia da evapotranspiração de referência estimada pelo modelo de Thornthwaite (1948);

De outra forma e, como forma de curiosidade, na pagina 166 deste manual há um gráfico que relaciona a evapotranspiração da cultura à depleção de água no solo ao fator de disponibilidade de água sendo assim, o termo f_{tabelado} também pode ser encontrado graficamente.

Sendo a grama uma cultura resistente ao stress hídrico, pertence à família botânica *Poaceae* tal como outras culturas, a mencionar a cana-de-açúcar (*Saccharum spp* L.), partiu-se do pressuposto que o coeficiente de disponibilidade de água no solo para esta cultura possua valores altos, sendo $0,65 \leq p \leq 0,8$ (máximo).

Como forma de comparar o procedimento de cálculo há a possibilidade de utilizar o procedimento descrito por Doorenbos e Kassan (1979).

Este procedimento é baseado na idéia de dividir os principais cultivos em quatro grupos distintos e associá-los à demanda evaporativa da atmosfera, as tabelas apresentadas a seguir auxiliam neste procedimento:

Tabela 1 – Divisão das culturas em grupos em função de sua sensibilidade ao déficit hídrico

Grupo	Cultivo
1	Cebola, Pimenta, Batata
2	Banana, couve, uva, ervilha, tomate
3	Alfafa, feijão, citros, amendoim, abacaxi, girassol, melancia, trigo
4	Algodão, milho, oliveira, sorgo, soja, beterraba, cana-de-açúcar, tabaco

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassan (1979 p. 31)

Tabela 2 – Fator de disponibilidade de água no solo em função do grupo de cultura e da demanda evaporativa da atmosfera

Grupo de Cultivo	Evapotranspiração (mm/dia)						
	2	3	4	5	6	7	8
1	0,50	0,425	0,35	0,30	0,25	0,225	0,20
2	0,675	0,575	0,475	0,40	0,35	0,325	0,275
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,425	0,375
4	0,875	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45

Fonte: Adaptado de Doorenbos e Kassan (1979 p. 31)

Neste trabalho foi utilizado o grupo de cultivo 4 como aquele de maior representatividade do comportamento fisiológico da cultura de resposta à demanda evaporativa da atmosfera.

A disponibilidade total de água no solo é uma característica do solo. Corresponde à água nele armazenada no intervalo entre as umidades correspondentes à capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2013, p.29)

A capacidade total de água no solo (CTA) é a quantidade de água que pode ser armazenada no solo, disponível para as plantas, até a profundidade efetiva do sistema radicular. (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008, p.132). A CTA também é conhecida como capacidade de água disponível no solo (CAD).

A capacidade real de água no solo segundo Albuquerque e Durães (2008), é a parcela da capacidade total de água no solo que a cultura pode absorver, sem sofrer estresse hídrico.

Baseado em Albuquerque e Durães (2008) esses três parâmetros fundamentais são calculados pelas expressões a seguir:

$$DTA = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) = [1000(\theta_{CC} - \theta_{PMP})] \div 100 = 10(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (22)$$

$$CTA = DTA \cdot Z_r = 10(\theta_{CC} - \theta_{PMP})Z_r \quad (23)$$

$$CRA = fCTA \quad (24)$$

Onde: DTA é a disponibilidade total de água no solo, seus valores são apresentados em $\text{mm}_{\text{água}} / \text{m}_{\text{solo}}$ na expressão inicial e quando dividida a equação por 100 ($1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$) seus valores são apresentados em $\text{mm}_{\text{água}} / \text{cm}_{\text{solo}}$; θ_{CC} e θ_{PMP} são, respectivamente, a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e a umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente em escala decimal; CTA ($\text{mm}_{\text{água}} / \text{cm}_{\text{solo}}$) ou CAD é a capacidade total de água no solo e Z_r (cm) é a profundidade efetiva do sistema radicular; CRA ($\text{mm}_{\text{água}} / \text{cm}_{\text{solo}}$) é a capacidade real de água no solo e é dependente do fator (f; decimal) de disponibilidade de água no solo;

Por mais que a profundidade efetiva do sistema radicular se apresenta no intervalo de 0,30 – 0,35 m, isto levando-se em consideração os parâmetros físicos do solo, optou-se por questão de segurança da manutenção do estado hídrico ótimo do solo para a cultura, adotar a efeito de cálculo o valor da profundidade máxima do perfil do solo que é de 0,50 m.

1.4.6 Calibração

A calibração do equipamento (ANEXO - Imagens das etapas do projeto) foi feita em função da capacidade real de água, calculada e ajustada a 74 mm sendo que os dados obtidos por base dos cálculos serão apresentados mais adiante neste trabalho. Feita pelo método de pares de entrada-saída de medidas de variação de peso trabalhou-se da seguinte forma. Adicionadas as camadas de brita e solo, correspondentes à fase de reestruturação do perfil deste, três amostras de solo peneirado de dentro do tanque foram retiradas para se obter o conhecimento da umidade gravimétrica e efetuar possíveis comparações e estudos. É válido ressaltar que uma vez conhecendo a densidade do solo e a umidade gravimétrica do mesmo, é possível obter a umidade volumétrica para uma determinada umidade gravimétrica em questão.

Em seguida, os sacos de “massa-padrão” foram confeccionados. São sacos de ráfia com brita nº1 em seu interior pesados em balança eletrônica. Ao todo foram utilizados 20 sacos ordenados do seguinte modo, em escala crescente de massa: 2 x 1 kg; 2 x 2 kg; 2 x 4 kg; 10 x 7,4 kg; 2 x 10 kg; 2 x 20 kg. Em milímetros equivalem a: 2 x 0,5 mm; 2 x 1 mm; 2 x 2 mm; 10 x 3,7 mm; 2 x 5 mm; 2 x 10mm.

Para efeito de cálculo os valores foram arredondados já que o diâmetro da área evaporativa (superfície gramada) é de aproximadamente 1,6 m e a área propriamente dita é aproximadamente de 2,01 m².

A calibração foi feita considerando-se o limite inferior e o limite superior de leitura para a possível quantidade ideal de água no sistema. Sendo que leituras abaixo do limite inferior indicarão quantidades de água abaixo do ponto de murcha permanente e leituras acima do limite superior indicarão o solo com tendência à saturação.

Uma vez determinadas as “massas-padrão”, foi ajustada a programação do *datalogger* e estabelecido o intervalo de leitura para cinco segundos.

Lonas foram colocadas na superfície do solo para evitar a evaporação de água e garantir estabilidade da leitura. Anotado em escala de milivoltagem o ponto zero (tara) da leitura do sistema deu-se início à calibração. Os sacos foram adicionados, um a um em escala crescente de massa, sobre a superfície do solo revestida com lona, com um intervalo de 15 a 20 segundos entre a adição de um com relação ao outro, as anotações em milivoltagem foram feitas concomitantemente.

Uma vez inserida toda a massa no sistema os sacos foram retirados também um a um em escala decrescente de massa até voltar ao marco zero de leitura do sistema.

Estas medidas foram tomadas a fim de evitar variações bruscas de leitura e garantir maior precisão. Foram feitas três repetições e 60 valores de pares de entrada e saída foram anotados para a confecção da curva de calibração do equipamento.

Após este procedimento a grama foi colocada no tanque. Houve a necessidade de adicionar uma pequena camada de solo para nivelar a grama dentro do mesmo.

Feito este procedimento a leitura em milivoltagem do *datalogger* foi anotada para se ter o conhecimento da massa de grama colocada no tanque em relação à massa total previamente anotada. Isto foi de suma importância, pois, entrou como fator de ajuste aos valores obtidos na fase de calibração. A tabelada dos valores ajustados de calibração é exibida a seguir:

Tabela 3 – Calibração do lisímetro de pesagem, pares de entrada e saída

n	milímetro		1ª Repetição		2ª Repetição		3ª Repetição	
	mm	Σ mm	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
	0	0	0,6350	0,6350	0,6350	0,6350	0,6350	0,6350
1	0,5	0,5	0,6352	0,6352	0,6351	0,6352	0,6352	0,6351
2	0,5	1	0,6355	0,6355	0,6355	0,6355	0,6353	0,6355
3	1	2	0,6362	0,6361	0,6363	0,6361	0,6363	0,6360
4	1	3	0,6369	0,6368	0,6369	0,6368	0,6368	0,6367
5	2	5	0,6380	0,6382	0,6383	0,6381	0,6382	0,6382
6	2	7	0,6394	0,6394	0,6396	0,6387	0,6395	0,6395

Continuação tabela 3:

7	3,7	10,7	0,6421	0,6420	0,6419	0,6419	0,6420	0,6420
8	3,7	14,4	0,6446	0,6444	0,6445	0,6444	0,6437	0,6444
9	3,7	18,1	0,6471	0,6471	0,6452	0,6469	0,6469	0,6470
10	3,7	21,8	0,6494	0,6495	0,6495	0,6494	0,6494	0,6494
11	3,7	25,5	0,6520	0,6521	0,6520	0,6519	0,6520	0,6519
12	3,7	29,2	0,6545	0,6544	0,6545	0,6545	0,6545	0,6545
13	3,7	32,9	0,6569	0,6569	0,6569	0,6569	0,6568	0,6569
14	3,7	36,6	0,6595	0,6594	0,6595	0,6595	0,6593	0,6592
15	3,7	40,3	0,6620	0,6619	0,6619	0,6619	0,6619	0,6619
16	3,7	44	0,6644	0,6643	0,6644	0,6644	0,6643	0,6643
17	5	49	0,6678	0,6677	0,6679	0,6678	0,6678	0,6677
18	5	54	0,6712	0,6712	0,6711	0,6711	0,6711	0,6711
19	10	64	0,6779	0,6778	0,6776	0,6775	0,6778	0,6777
20	10	74	0,6846	0,6846	0,6846	0,6846	0,6845	0,6845

A curva de calibração será apresentada mais adiante no texto na parte de resultados e discussão.

1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta parte do trabalho terá seu início apresentando os resultados dos parâmetros físicos e químicos do solo, passando pelos dados de disponibilidade hídrica do mesmo. Em seguida os resultados da calibração serão apresentados e por último os dados da leitura do equipamento. Na tabela 4 são apresentados os dados relativos à análise granulométrica do solo. É importante ressaltar que a análise granulométrica foi feita somente para o perfil inicial do solo. A densidade das partículas também será apresentada nesta tabela:

Tabela 4 – Análise granulométrica e densidade da partícula (ρ_p) do solo do local de estudo

z (m)	Areia			Argila	Silte	Umidade (%)	ρ_p (g/cm ³)
	Grossa	Fina	Total (g/kg)				
0 – 0,15	---	---	469	360	171	17	2,72
0,15 – 0,30	---	---	---	---	---	17	2,74
0,30 – 0,45	---	---	---	---	---	16	2,70

* Densidade das partículas feita pelo método do balão volumétrico;

As médias dos valores das umidades volumétricas na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, da umidade gravimétrica bem como da densidade do solo e da porosidade total do solo são apresentados na tabela 5. É importante ressaltar que os valores da porosidade total do solo foram obtidos de duas formas distintas: uma em função da razão entre a densidade do solo e a densidade das partículas enquanto a outra em função da umidade volumétrica de saturação do solo. O intervalo hídrico de umidade do solo é obtido pela simples diferença entre as umidades volumétricas (capacidade de campo e ponto de murcha permanente) e é um parâmetro importante para classificar se as análises foram bem procedidas quando comparadas à textura do solo em questão. Um intervalo na ordem de 18% é indicativo de uma boa amostragem e boa representatividade das características físicas do solo (N.E.H, 1991).

Segue abaixo a tabela 5:

Tabela 5 – Valores médios das umidades volumétricas na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), densidade do solo (ρ_s), porosidade total (α) do solo em função da umidade de saturação (α_1) e em função das densidades do solo e das partículas (α_2), umidade gravimétrica (μ) do solo previamente à calibração e intervalo hídrico do solo

Profundidade	θ_{CC}	θ_{PMP}	ρ_s	* α_1	* α_2	μ	*Intervalo hídrico
z (m)	(%)	(%)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	CC → PMP
0 – 0,15	40	18	1,05	47	61	7,49	22
0,15 – 0,30	36	17	1,11	44	59	8,13	18
0,30 – 0,45	30	16	1,53	32	43	7,85	14
Média	35	17	1,23	41	54	7,82	18

* Obtida em função da umidade volumétrica de saturação (θ_s) logo: $\alpha_1 = \theta_s$;

* Obtida em função da equação $\alpha_2 = 100 \cdot (1 - \rho_s/\rho_p)$;

* Intervalo hídrico = $\theta_{CC} - \theta_{PMP}$

Com relação a esses dados apresentados algumas considerações devem ser feitas.

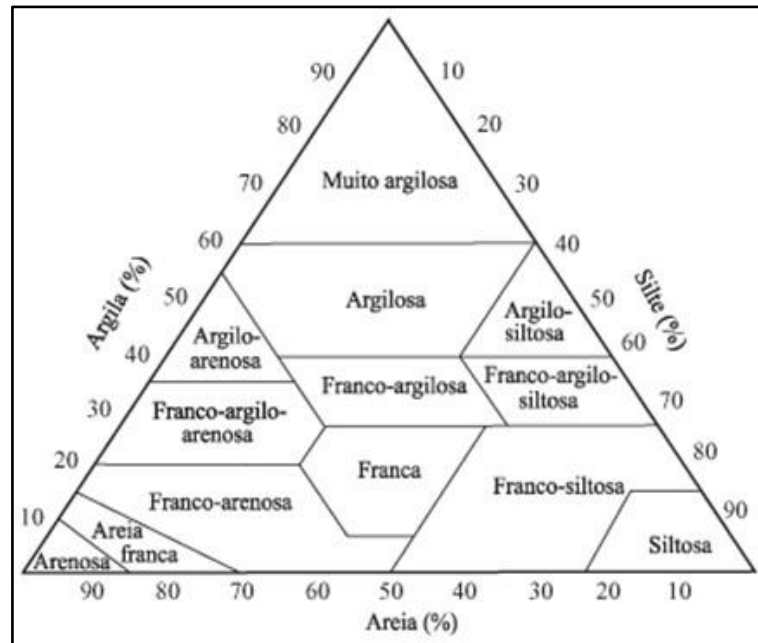
Em função dos valores médios observados, é possível verificar que a amostragem foi bem executada, pois, houve uma redução dos valores das umidades volumétricas e da porosidade total à medida que se aprofunda o perfil do solo.

Isso é indicativo da estrutura do solo que é mais coesa em profundidade devido à ação de compactação. Quanto maior a densidade do solo, menores serão os valores destes outros parâmetros inicialmente apresentados.

Os valores apresentados também são indicativos de uma elevada taxa de absorção/retenção de água o que é condizente com solos possuidores de elevados teores de argila. Quanto à análise granulométrica a textura deste solo apresenta-se no intervalo entre a classificação de solo de textura argilosa e média, devido ao percentual de argila apresentado.

O triângulo textural, apresentado na figura 7, demonstra com maior clareza esta questão:

Figura 7 – Diagrama textural proposto pelo U.S.D.A – *United States Department of Agriculture*



Fonte: Adaptado de Freire O. (2006 p. 16)

Devido ao elevado percentual de areia (46,9%) em relação ao de argila (36%) chegou-se a conclusão que este solo possui textura média sendo considerado como um solo Latossolo Franco Argilo-Arenoso.

Isso também apresenta importância quando se avalia os parâmetros físico-hídricos do solo que apresentam valores e comportamentos indicativos desse tipo de textura.

Com relação aos valores de porosidade total do solo, de uma forma geral, em ambos os casos os valores foram decrescentes quanto maior a profundidade do perfil amostrado.

Mesmo assim, houve uma variação média de 25% a mais para os valores calculados de porosidade total em função da densidade da partícula e da densidade do solo em relação aqueles relativos à umidade volumétrica de saturação.

Sendo assim, a efeito de cálculo, o valor aproximado de 48% para a porosidade total que é uma média geral entre os valores obtidos deve receber maior ênfase, a fim de que se reduzam incertezas quando for feita uma análise geral do comportamento físico do solo quando nas condições de saturação hídrica.

Sobre a densidade do solo os valores encontrados são coerentes com a textura do mesmo. De acordo com Amaro et al. (2008), para solos argilosos, seus valores oscilam em torno de 1 a 1,25 g/cm³. Enquanto que para solos arenosos os valores oscilam em torno de 1,25 a 1,40 g/cm³. Quanto á porosidade total este mesmo autor menciona que é comum encontrar porosidade total em torno de 35 a 50% nos horizontes superficiais de solos arenosos e 40 a 60% em solos argilosos. A tabela 6 mostra e compara os valores da densidade do solo antes e após ter sido reestruturado dentro do tanque, bem como as medidas internas do tanque utilizadas para a obtenção dos volumes utilizados para os cálculos:

Tabela 6 – Valores de densidade do solo, antes e após ter sido reestruturado

*Camada	Profundidade z (m)	Massa (kg)	Altura (m)	Diâmetro (m)	Densidade do Solo (ρ_s ; g/cm ³)	
					*Reestruturado	Original
Z ₁	0 – 0,10	231	0,10	1,60	1,15	1,05
Z ₂	0,10 – 0,20	247	0,10	1,50	1,39	1,11
Z ₃	0,20 – 0,30	195	0,10	1,46	1,16	1,53
**Z ₄	0,30 – 0,45	350	0,15	1,42	1,47	---
**Z ₅	0,45 – 0,70	500	0,25	1,36	1,38	---

* Camadas Z₁, Z₂ e Z₃ são referentes aos blocos entalhados;

** Camada Z₄: referente à camada de solo desestruturado (peneirado);

** Cama da Z₅: referente à camada de brita;

* Valores arredondados;

A média dos valores obtidos da densidade para as camadas Z₁, Z₂ e Z₃ é igual a 1,23 g/cm³ valor igual à média dos valores originais apresentados na tabela 5. Isso apresenta grande importância já que é a camada representativa da profundidade efetiva do sistema radicular. Isso também é indicativo da funcionalidade do uso dos blocos entalhados já que os valores ligeiramente superiores de densidade apresentados, principalmente no intervalo de profundidade de 0 – 0,20 m, não serão permanentes

Como houve a necessidade de utilizar uma pequena fração de solo peneirado para nivelamento e ajuste do solo dentro do tanque, este solo, uma vez úmido, irá se reestruturar e ao longo do tempo os parâmetros físicos se aproximarão daqueles originais. De outra forma a garantia de maior presença de macroporos também é esperada neste intervalo do perfil do solo já que será o local aonde haverá maior presença do sistema radicular da cultura.

Quanto à camada Z₄ espera-se que não haja grande variação de sua densidade, pois, o valor apresentado já é indicativo de compactação. Isto já esperado, pois, esta camada originalmente, é naturalmente compactada por efeito da pressão da camada de solo imediatamente superior à mesma.

A parte da química e fertilidade do solo é apresentada na tabela 7:

Tabela 7 – Resultados da análise química do solo

pH	M.O	P _{resina}	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³				mmol _c /dm ³				
4,0	29	15	---	94	2,6	18	9	29	124	24

Levando-se por base o Boletim Técnico 100 (pág. 263 a 271) a cultura utilizada no experimento é pertencente ao grupo 3 de forrageiras.

As gramíneas presentes neste grupo apresentam algumas características importantes, principalmente, a rusticidade e a capacidade de se desenvolverem em solos de pH na faixa de 4 a 5, considerado como ácido para algumas culturas além de possuírem menor exigência de nutrientes para seu desenvolvimento quando comparadas com culturas do grupo 1. De uma forma geral, o pH deste solo apresenta-se com um valor indicativo de acidez, porém a cultura se desenvolveu normalmente. É importante recordar que a grama neste experimento se apresenta na condição de pousio. O valor da saturação por bases (V%) apresenta-se baixo (24%) tanto para formação como para manutenção, o ideal seria na faixa de 40%. O mesmo pode ser mencionado a respeito da soma de bases (SB).

Apesar disto, os teores indicativos de cálcio e magnésio trocável estão elevados e indicam boa disponibilidade para a cultura.

O mesmo pode ser mencionado com relação ao fósforo e potássio que apresentam teores médios de disponibilidade. Os teores de nitrogênio no solo não foram medidos, porém a cultura apresentou grande vigor de desenvolvimento após ter sido transplantada para dentro do tanque, sendo que a ciclagem natural deste nutriente está sendo suficiente para o pleno desenvolvimento da mesma no campo.

Quanto aos cálculos da disponibilidade de água no solo, os valores das médias de temperatura e os resultados da estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite (1948) são apresentados na tabela 8:

Tabela 8 – Valores de temperatura e da evapotranspiração de referência estimado pelo método de Thornthwaite (1948) para a cidade de Botucatu-SP, base de dados com normal climatológica de 40 anos (1971 – 2011)

Nº de dias	Mês	Temperatura (°C)	ET ₀ calculado (mm/mês)	*Fotoperíodo (N; horas)	Correção	ET ₀ corrigido (mm/mês)	ET ₀ corrigido (mm/dia)
31	Jan	22,82	97	13,28	1,14	110,60	3,57
28	Fev	23,24	101	12,76	0,99	99,97	3,57
31	Mar	22,71	96	12,14	1,05	100,02	3,23
30	Abr	21,12	81	11,43	0,95	77,52	2,58
31	Mai	18,38	60	10,86	0,94	55,84	1,80
30	Jun	17,24	52	10,56	0,88	45,55	1,52
31	Júl	17,21	52	10,7	0,92	47,51	1,53
31	Ago	18,73	62	11,21	0,97	60,11	1,94
30	Set	19,39	67	11,9	0,99	66,71	2,22
31	Out	20,79	79	12,58	1,08	85,12	2,75
30	Nov	21,71	87	13,7	1,14	98,80	3,29
31	Dez	22,31	92	13,44	1,16	106,43	3,43
Média	---	20,47	77	12	1	79,52	2,62

* Valores referentes ao 15º dia de cada mês;

Analisando a tabela 8 é possível ter uma base de que, em média, a evapotranspiração de referência em escala diária oscila de 2,62 a 3 mm/dia, caso seus valores sejam arredondados.

Pela metodologia aplicada, para localidades presentes em regiões tropicais e subtropicais com clima úmido e sub-úmido, tanto a temperatura média anual (de clima moderado) como a evapotranspiração estimada de aproximadamente 3 mm/dia é condizente com aquilo que foi exposto por Allen et al. (1998).

Com relação à cultura e suas características fisiológicas de sensibilidade ao déficit hídrico (tabela 1) esta se enquadra no grupo 4, sendo considerada como uma cultura resistente, isso também fica evidenciado quando se analisa a tabela 2.

Se for levar em consideração somente o valor da evapotranspiração estimada obtido e o grupo de cultura, o fator de disponibilidade de água no solo encontrado é de 0,80. Porém, como já mencionado anteriormente, o valor deste fator é variável em um intervalo de 0,65 a 0,80. Sendo assim utilizando a equação 20, o valor aproximado de 0,70 de f_{tabelado} segundo o manual da FAO-56 (tabela 22, pág. 163 – 165, cap. 8) e $ET_C \sim ET_0$ de 3 mm/dia:

$$f = 0,70 + 0,04 \cdot (5 - 3) = 0,78 \cong 0,80$$

Caso fosse utilizado o valor de 0,65 para f_{tabelado} e o valor de 2,62 mm/dia da evapotranspiração estimada:

$$f = 0,65 + 0,04 \cdot (5 - 2,62) = 0,745 \cong 0,75$$

Pela proximidade dos valores obtidos optou-se por manter 0,80 para o fator de disponibilidade de água no solo. Com isso, o cálculo da disponibilidade de água no solo presente no tanque foi procedido em função dos valores médios das umidades volumétricas como apresentado a seguir:

$$DTA = 10 \cdot (0,35 - 0,17) = 1,8 \text{ mm}_{\text{água}} / \text{cm}_{\text{solo}}$$

$$CTA = [10 \cdot (0,35 - 0,17)] \cdot 50 \text{ cm} = 89,95 \cong 90 \text{ mm}$$

$$CRA = 0,80. \{ [10 \cdot (0,35 - 0,17)] \cdot 50cm \} = 71,96 \cong 72 \text{ mm}$$

O intervalo de disponibilidade hídrica ideal para o experimento para uma profundidade de 0,5 m de solo presente dentro do tanque está na faixa de 89 a 72 mm.

A calibração do equipamento foi feita tendendo para o limite inferior do intervalo de disponibilidade, pois com isso, há a garantia que toda vez que se faça a irrigação não haja interferência nas medidas obtidas nem por excesso de água livre ou por efeitos de retenção de água no solo.

A utilização do valor de 74 mm na calibração foi feita como uma forma de adequação, pois, os dois últimos valores de massa no sistema (20 kg e/ou 10 mm) foram feitos desta forma para evitar possíveis interferências com casas decimais quando no momento da confecção da “massa-padrão”.

Além disso, utilizaram-se esses dois valores da forma da qual foi apresentada, para que se pudesse ter conhecimento da resposta do sistema quando houvesse a entrada de grandes volumes de água, por exemplo, em casos de intensa precipitação ou irrigação.

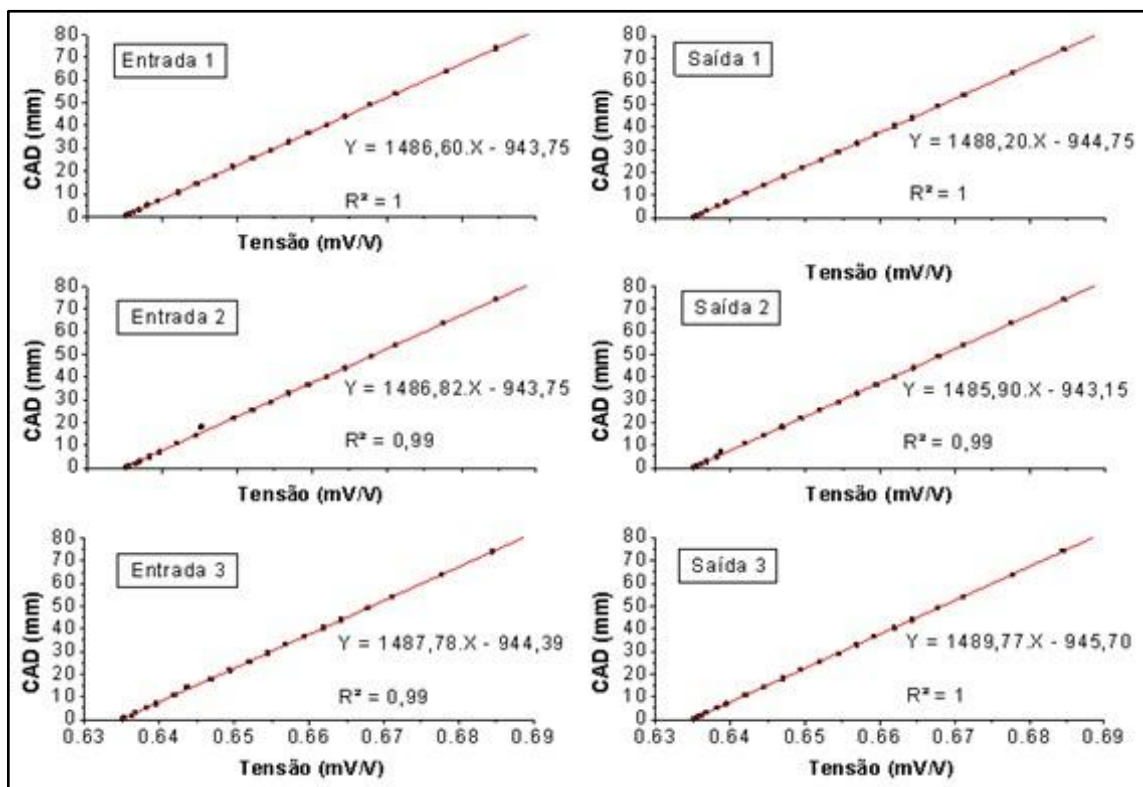
A viabilidade desta metodologia foi comprovada pela comparação dos valores de leitura acusados no *data logger* com a leitura de tensiômetros/vacuômetros instalados dentro e fora do tanque a 0,20 m de profundidade. Estes tensiômetros possuem sua leitura em escala de milímetros de mercúrio.

Sendo assim, segundo Reichardt e Timm (2004) para solos arenosos a leitura da umidade de um solo quando este se apresenta com umidade na capacidade de campo está na faixa de 0,1 bar e/ou 75 mmHg e para solos argilosos os valores chegam até 0,33 bar e/ou 247,5 mmHg. Como este solo é de textura média, considerou-se que o ideal seria a leitura média destes valores como intervalo máximo para a condição de capacidade de campo. Sendo assim, variando de 0,1 bar a 0,22 bar e/ou 165 mmHg. No campo quando o solo dentro do tanque se apresentava com uma disponibilidade de água de 89 mm a leitura do tensiômetro acusava valores na ordem de 75 mmHg enquanto quando estava com 74 mm de água disponível a leitura acusava valores no intervalo de 100 a 120 mmHg.

No caso do tensiômetro instalado imediatamente fora do tanque, na zona tampão, procurou-se manter leituras semelhantes.

Este procedimento foi tomado como forma de garantir um estado hídrico semelhante do solo dentro e fora do tanque. Isso também propicia a cultura imediatamente fora do tanque estar em condições fisiológicas equiparáveis. Sobre a calibração do equipamento os gráficos com os pares de entrada e saída são apresentados na figura 8:

Figura 8 – Relação entre a variação das lâminas de água (relativa á capacidade total de água no solo – CTA ou CAD; mm) e tensão (mV/V) emitida pelas células de carga, o termo “entrada” é referente ao carregamento e o termo “saída” se refere ao descarregamento do sistema

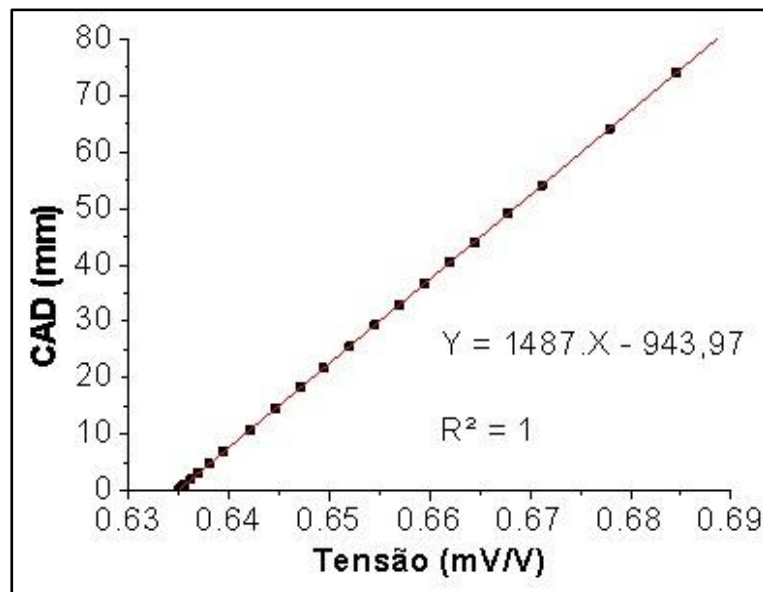


Como podem ser observados os coeficientes de determinação (R^2), apresentados para os três pares de entrada e saída foram muito elevados alguns próximos de um e outros com este exato valor. Isto é indicativo de uma ótima correlação da resposta e da sensibilidade de leitura esperada dos sensores utilizados no equipamento. Apresentou-se, inclusive, como sendo um bom demonstrativo da funcionalidade da metodologia aplicada na calibração. Percebe-se também, por via destes gráficos, que o tempo de espera para a estabilização da leitura do sistema foi adequado.

Sendo incluso que o intervalo de cinco segundos de leitura para um *datalogger* é mais do que suficiente para obtenção de dados deste tipo.

Na figura 9 é apresentada a regressão linear com dos dados de leitura da calibração com os parâmetros da equação já ajustados para a utilização do equipamento:

Figura 9 – Regressão linear e equação ajustada utilizada na programação do datalogger (x = tensão em mV/V; y = CTA ou CAD em milímetros)



A leitura do sistema é relativa à capacidade total de água do solo apresentando variação em escala milimétrica.

A medida da evapotranspiração é obtida por base da diferença entre o valor inicial e o valor final apresentados de um dia para o outro da água disponível no sistema, ou seja, em função da depleção e/ou consumo da água por este processo.

Neste gráfico fica possível de se observar aquilo que foi mencionado anteriormente no que diz respeito aos extremos da capacidade de leitura das células de carga.

A importância do uso de pequenos valores, relativos à massa do sistema, no início da fase de calibração se dá pela viabilidade de estimar com precisão o intervalo hídrico representativo do ponto de murcha permanente do solo.

O mesmo pode ser mencionado na condição contrária, quando no estado de capacidade de campo.

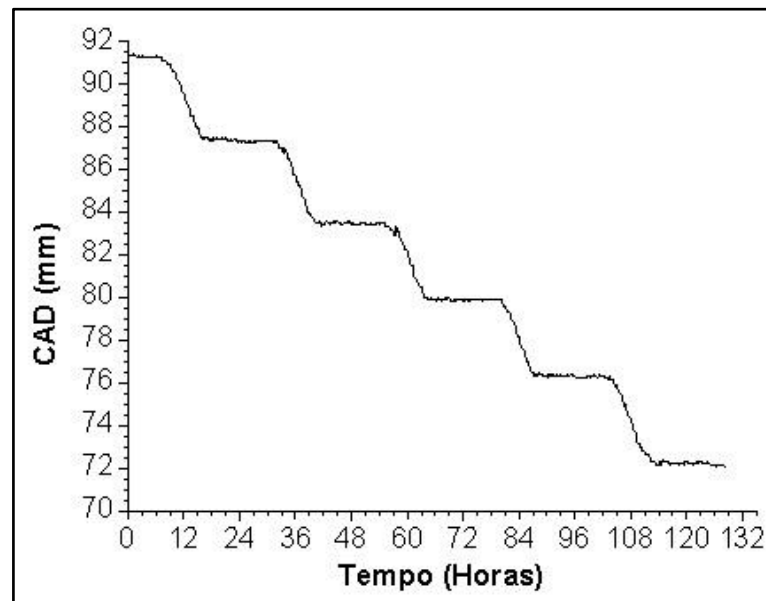
É importante mencionar que o desvio padrão apresentado das leituras para esta equação é da ordem de 1,19 mm.

Observa-se também que, uma vez tendendo à saturação de água no solo, a qualidade da leitura em milivoltagem do sistema apresenta uma boa margem de segurança já que a variação é na ordem de $\pm 0,1$ mV/V (0,68 a $\pm 0,78$).

Quando se trata de água por vias de precipitação esta variação é um indicativo de grandes volumes de água, porém, na capacidade de leitura do sensor esta variação está plenamente dentro dos seus limites. Na figura 10 é apresentado um gráfico com a leitura do sistema em escala semanal (21 a 26 de Março).

Em condições ideais para as medidas, sem ocorrência de precipitação, solo no estado hídrico ótimo, céu com poucas nuvens com temperatura média diária de 23 °C:

Figura 10 – Variação da água disponível do solo em função do processo de evapotranspiração



Pelo comportamento da variação da água disponível no solo percebe-se que o período de ocorrência de maior depleção da água presente neste se dá durante o período diurno, quando há incidência de radiação solar e aquecimento contínuo da superfície terrestre.

No período noturno a leitura não varia, permanecendo estável.

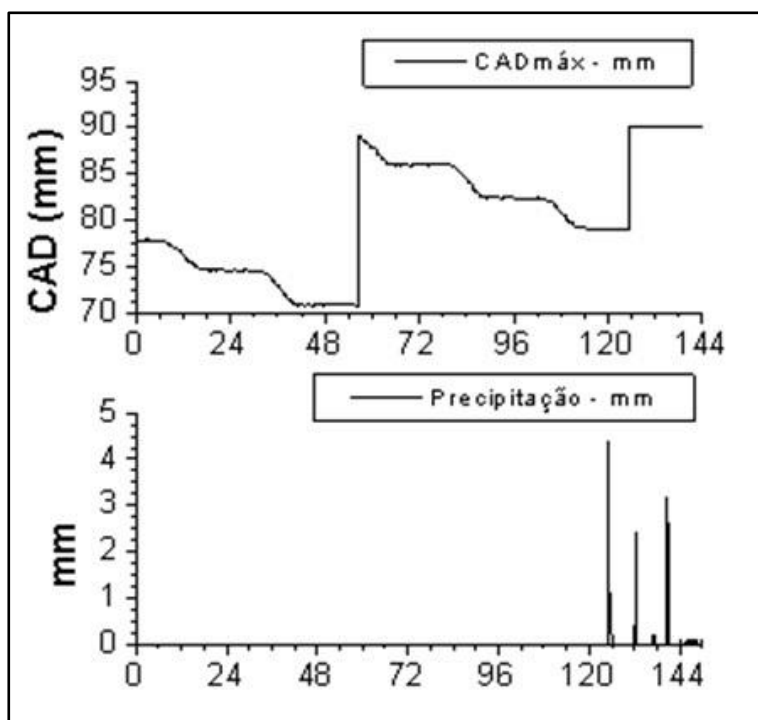
Fica bem observada a estreita correlação com fatores como o número de horas de brilho solar, fotoperíodo e saldo de radiação. Sendo assim, para esta época do ano nesta localidade, o processo de evapotranspiração ocorre de forma pronunciada no intervalo de 11 a 12 horas, entre o nascer ($\pm 6h30min$) e por do Sol ($\pm 18h30min$).

Isso também é dependente da fisiologia da cultura que, no que diz respeito ao consumo de água durante este período do dia, se apresenta em plena atividade.

Estes aspectos observados vão de acordo com Allen et al. (1998) quando se leva em consideração os aspectos de resistência dos estômatos, e da resistência da própria superfície foliar a fatores como a ação do vento, da radiação incidente, da variação de umidade e temperatura do ar. Sendo assim, um valor médio da medida da evapotranspiração, quando analisando este gráfico, está na ordem de 3,2 mm/dia. A seguir será apresentada a resposta da leitura do sistema para duas condições distintas: no primeiro momento quando houve irrigação suplementar e no segundo momento quando houve precipitação.

A escala temporal é de dez dias corridos (1 a 10 de Abril) os gráficos são apresentados na figura 11:

Figura 11 – Respostas do lisímetro à irrigação e precipitação



Esta irrigação é feita sempre que a leitura da capacidade total de água no solo atinja o limite inferior que é de 74 mm. Sempre é adicionada uma lâmina de 15 mm fazendo com que o valor ideal fique dentro do intervalo de 74 a 89 mm.

Ao se observar o gráfico é possível verificar que a irrigação ocorreu no início do terceiro dia corrido, no período da manhã.

A rápida variação da água disponível no solo à irrigação é pontual e sempre será observável desta forma em períodos não chuvosos.

Quanto ao período com precipitação pode-se observar que o início da mesma se deu na madrugada do quinto dia corrido e se estendeu, com variações de intensidade e frequência até o sexto dia. De uma forma geral, o sistema pôde medir com precisão a variação de carga no sistema, dando respostas da variação da água disponível no solo, similar às oscilações de precipitação indicados pelo gráfico.

Valores de capacidade total de água em torno de 125 mm puderam ser observados e ocorreram quando o solo estava muito próximo da condição de saturação.

Isso se dá pelo fato que, com o uso de valores médios das umidades volumétricas do solo, este quando na capacidade de campo (com uma capacidade total de água de 90 mm) apresenta uma umidade volumétrica na ordem de 35% e, quando com uma umidade volumétrica na faixa de 48% apresenta, teoricamente, valores aproximados de 123 mm de água armazenada.

Valores acima de 123 mm só poderão ser observados caso haja a ocorrência de eventos extremos de precipitação cujo potencial de pressão no solo passe a ser predominante, com a condutividade hidráulica tendendo ao estado de saturação. Neste momento o processo de drenagem é plenamente favorecido.

1.6 CONCLUSÕES

Estes resultados apresentados de resposta da sensibilidade da leitura do sistema são indicativos da eficácia da metodologia utilizada, pois eram resultados esperados desde o início do projeto como um todo.

Uma medida com a qualidade apresentada é dependente não só de excelentes medidas construtivas no que diz respeito principalmente do aprumo da estrutura como um todo, mas também, da estrutura de suporte que possui a principal função de distribuir igualitariamente o peso do tanque para os sensores. Estes aspectos são de suma importância, pois é isto que garante a perfeita sincronização da leitura das células de carga. Considerações também devem ser feitas com relação à espessura das paredes e a preocupação em se fazer uma estrutura a mais compacta possível (certamente que quanto maior o tamanho do tanque com solo, maior a representatividade) para que se tenha o mínimo de interferência nas medidas futuras.

Quanto aos parâmetros físicos do solo a metodologia aplicada (com o uso de blocos entalhados) apresentou-se amplamente funcional em casos onde não seja possível retirar o monólito inteiriço pelo uso de maquinário. Sendo necessário, para ganho de tempo, haver mão-de-obra auxiliar e especializada para a execução da retirada destes blocos, pois, exige uma ampla carga horária e também por ser um serviço extremamente metódico.

O valor de 3,2 mm/dia, para uma semana de medida em condições ideais também é um bom indicativo da qualidade de medida do equipamento, pois, já é equiparável a modelos clássico de estimativa que muitas vezes são exigentes de dados meteorológicos em larga escala temporal para a obtenção de resultados representativos.

1.7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)

ALBUQUERQUE, P. E. P. de.; DURÃES, F. O. M. Uso e manejo de irrigação. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. 2ª. ed. Brasília, DF. 2008

BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 4. 2. 198-203. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119017351014>> Acesso em: 20 de Mar. 2016

BERNARDO S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. 8. Ed. – Viçosa, : Ed. UFV, 2013.

CAMPECHE, L. F. M. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.5, p.519-525, 2011. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n5/v15n5a13.pdf>> Acesso em: 14 de Jan. 2015.

CARVALHO, H. P.; MELO, B.; ATARASSI, R. T.; CAMARGO, R.; SILVA, da. C. R.; MORAES, M. R. B. Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café. Biosci. J., Uberlândia, v.29, n.6, p. 1750-1760, 2013. Disponível em <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22303>> Acesso em: 20 de Nov. 2014.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efectos de água sobre el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO, 1979. 212p. (Estudio FAO: Riego Y Drenaje)

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro - RJ, 1997. 212p.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. Renewable Energy, vol. 36, pp. 169-178, 2011. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110002740>> Acesso em: 10 de Abr. 2017.

FILHO, J. A.; JÚNIOR, R. N. A.; MOTA, J. C. A. Física do Solo: conceitos e aplicações. Imprensa Universitária. Fortaleza, 2008. 290 p.

FREIRE, O. Solos das regiões tropicais. Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestas – FEPA. Unesp – Câmpus de Botucatu – Lageado, Botucatu-SP. 2006, 268 p.

JESUS, W. R. Desempenho do método de Penman modificado por equação proposta de estimativa do saldo de radiação de ondas longas. 2000. ix, 59 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2000. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101845>> Acesso em: 20 de Mar. 2016.

JIA, X.; DUKES, M. D.; JACOBS, J. M.; IRMAK, S. Weighing Lysimeters for Evapotranspiration Research in a Humid Environment. American Society of Agricultural and Biological Engineers, vol. 49(2), pp. 12, 2006. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=20414&t=2&redir=&redirType=>>> Acesso em: 20 de Nov. 2014.

National Engineering Handbook – NEH. 15 – 1, United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 2nd ed., 210 – VI, 1991.

PUPPO, L.; GARCÍA-PETILLO, M. Determinación del consumo de agua Del duraznero por lisimetria. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.1, p.25-31, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n1/v14n01a04.pdf>> Acesso em: 14 de Jan. 2015.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo: Boletim técnico nº 100. Campinas-SP. IAC, 1997. 285p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 1ª ed, Barueri – SP: Manole, 2004. 478 p.

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. A. C. de.; OLIVEIRA, A. S. de.; GOMES JÚNIOR, J. F.; VELLAME, L. M. Design, installation, and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. Water resources and Irrigation Management, v.2, n.2, p.77-85, 2013. Disponível em: <<https://www2.ufrb.edu.br/wrim/images/wrim-2-2-2013/v02n02a02.pdf>> Acesso em: 20 de Nov. 2014.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R. Meteorologia Agrícola. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Dpto. Ciências Exatas, Piracicaba-SP, 2007

2. CAPÍTULO 2: ESTUDO COMPARATIVO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) MEDIDA POR LISÍMETRO DE PESAGEM E ESTIMADA PELO MÉTODO DE THORNTHWAITE (1948): ANÁLISE EM ESCALA DIÁRIA

Daniel Gonçalves Gomes Jr., Alexandre Dal Pai, Enzo Dal Pai

2.1 RESUMO

Objetivou-se fazer uma análise comparativa, em escala diária, da evapotranspiração de referência estimada pelo método de Thornthwaite (1948) com a medida obtida por vias da lisimetria de pesagem. Utilizou-se um lisímetro de pesagem de seção circular (área evaporativa de 2 m²) para medir a evapotranspiração. O sistema de pesagem é composto de três células de carga e dois pluviômetros (um para a medida da precipitação e outro para o volume drenado), a aquisição de dados foi feita pelo uso de um *datalogger* 21-X da *Campbell Scientific*®. O período de medição foi durante os meses de março a junho de 2017 e foram utilizadas as medidas de temperatura máxima e mínima para a estimativa da evapotranspiração. Foram utilizados os Índices estatísticos de comparação entre modelos MBE (*Mean Bias Error*) e RMSE (*Root Mean Square Error*) sendo atribuída a análise de variância de comparação entre médias junto do teste F-Snedecor e Teste-t de Student para quantificar e qualificar os resultados. De uma forma geral foram analisados 100 pares de valores e os resultados obtidos de 0,283 e 2,83 para o MBE e RMSE, respectivamente, indicam bom desempenho do modelo em longa escala de tempo, porém, com a possibilidade de um desvio médio de 2,83 mm em relação à medida do lisímetro. Tanto para o teste-F e para o teste-T, a 5% e 1% de significância, foi constatado não haver diferença significativa entre as médias dos valores medidos pelo equipamento em relação àqueles estimados pelo modelo.

Palavras-chave: Balanço hídrico, demanda hídrica atmosférica, modelo de estimativa.

COMPARATIVE STUDY OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION (ET_0) MEASURED BY WEIGHING LYSIMETER AND ESTIMATED BY THE THORNTHWAITHE METHODOLOGY (1948): DAILY-SCALE ANALYSIS

Gomes Jr, D. G.; Dal Pai, A.; Dal Pai, E.

2.2 ABSTRACT

This work aimed to make a comparative analysis, on a daily basis scale, of the reference evapotranspiration estimated by the method of Thornthwaite (1948) with the measurement obtained by means of the weighing lysimetry. A circular section weighing lysimeter (evaporative area of approximately 2 m²) was used to obtain the evapotranspiration measurement. The equipment consists of a weighing system with three load cells and two rain gauges (one for the measurement of precipitation, the other to measure the water drainage), data acquisition was done using a *Campbell Scientific*® 21-X *datalogger*. The measurement period was from March to June 2017 and maximum and minimum temperature measurements were used to estimate the reference evapotranspiration. Statistical Indicators of comparison between models MBE (*Mean Bias Error*) and RMSE (*Root Mean Square Error*) were used and the analysis of variance was compared between means with the F-Snedecor test and Student's t-Test to quantify and qualify the obtained results. In general, 100 pairs of values were analyzed and the results obtained of 0,283 and 2,83 for MBE and RMSE, respectively, indicate good performance of the model in a long time scale, but with the possibility of an deviation of 2,83 mm in relation to the lysimeter measurements. For both the F-test and the T-test, at 5% and 1% of significance, it was found that there was no significant difference between the averages of the measured values of the equipment and those estimated by the model.

Key words: Atmospheric water demand, estimate model, water balance.

2.3 INTRODUÇÃO

O conhecimento da demanda hídrica atmosférica é um assunto que recebe grande destaque no setor agrário, principalmente nos países que são considerados como referência na produção e exportação dos mais variados tipos de *commodities* agrícolas.

Anteriormente à ênfase no setor produtivo agrícola, os estudos da evaporação da água em corpos líquidos naturais como rios, lagos e oceanos e da transpiração da água em superfícies naturais vegetadas, recebiam algum tipo de consideração quando procurava-se estudar a dinâmica da água na atmosfera, sendo incluso a interação destes processos quando ocorrentes em bacias hidrográficas.

Atualmente esta demanda hídrica, também denominada pelo termo de evapotranspiração de referência, é amplamente utilizada na agricultura quando se pretende ter o conhecimento do requerimento hídrico de uma cultura para proceder com futuros planejamentos de sistema de irrigação a serem instalados numa determinada propriedade. Nos estudos de Agrometeorologia e/ou Climatologia Agrícola, comumente ensinados nos cursos de Agronomia, Hidrologia e até mesmo na Geografia os dados de evapotranspiração de referência são muitas vezes obtidos em função de modelos de estimativa. Estes modelos possuem seu uso recente, datando da primeira metade do século passado.

Segundo Camargo e Camargo (2000), Thornthwaite e Wilm (1944) foram os primeiros autores a definir a conceituação de evapotranspiração como a conhecemos hoje em dia.

Na área de atuação das ciências agronômicas, especificamente na área da climatologia agrícola, é muito comum o uso de dados em escalas semanal, decendial, mensal ou mesmo anual sendo atribuída grande viabilidade do uso de valores médios o que em alguns casos não é a melhor forma de representar as condições reais daquilo que ocorre no campo. Um modelo de estimativa que apresenta dados dos quais mais bem se aproxima de medidas de evapotranspiração de referência obtidas em escala diária, é o modelo proposto originalmente por Penman-Monteith (1948 – 1952), revisado por Allen et al. (1998) e apresentado por estes autores no manual FAO-56, atualmente considerado como um modelo padrão.

Para dar entrada na equação este modelo possui como desvantagem a exigência da medida de parâmetros muitas vezes onerosos de sua obtenção o que pode tornar inviável sua utilização pelo produtor rural, limitando-se, geralmente, somente a ambientes de pesquisa.

A estimativa da evapotranspiração de referência segundo o modelo de Thornthwaite (1948) é mais simples e apresenta sua funcionalidade quando se trabalha no mínimo em escala semanal. Intervalos de 10 dias e/ou em escala mensal também apresentam bons resultados. Porém segundo Sentelhas et al. (2007) é possível de se trabalhar em escala diária desde que se tenha conhecimento da temperatura média anual da localidade em função da normal climatológica e que se tenha o conhecimento, durante o período de estudo em questão, das temperaturas máxima e mínima.

O objetivo deste trabalho é de fazer uma análise comparativa, em escala diária, da evapotranspiração de referência estimada pelo método de Thornthwaite (1948) com a medida obtida por vias da lisimetria de pesagem e avaliar a funcionalidade deste modelo para intervalos curtos de tempo.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi realizado na Estação Evapotranspirométrica do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” presente na cidade de Botucatu-SP (22°50' S; 48°25' W e altitude média de 786 m), a aquisição de dados ocorreu no período de março a junho de 2017. Esta estação está presente em uma área com largura de 15 m e comprimento de 25 m (área aproximada de 375 m²) e possui sua superfície vegetada coberta por grama Batatais (*Paspalum notatum*) espécie vegetal que também foi inserida dentro do tanque do lisímetro. O solo é classificado como latossolo roxo distrófico, sua textura é franca argilo-arenosa, e o terreno apresenta uma declividade de 2%.

O lisímetro de pesagem utilizado para obter a medida da evapotranspiração de referência possui um tanque com capacidade volumétrica de 1,5 m³, sua área evaporativa aproximada é de 2 m². A profundidade efetiva do sistema radicular da cultura foi projetada para uma profundidade máxima de 0,5 m e a disponibilidade total de água no sistema é de 90 mm. Este equipamento, composto de uma seção circular, possui um sistema de pesagem com três células de carga da marca Samel L-2T com intervalo de sensibilidade de 2 mV/V $\pm$ 0,1% sendo incluso dois pluviômetros eletrônicos da *Texas Electronics*[®] modelo TR-525M, um utilizado para a medida da precipitação e outro inserido abaixo do tanque para obter a medida do volume drenado. A aquisição de dados foi feita pelo uso de um *datalogger* 21-X da *Campbell Scientific*[®]. Os dados de temperatura máxima e mínima durante o período de estudo foram disponibilizados pelo arquivo meteorológico do Departamento de Engenharia Rural, as medidas foram obtidas em estação automática.

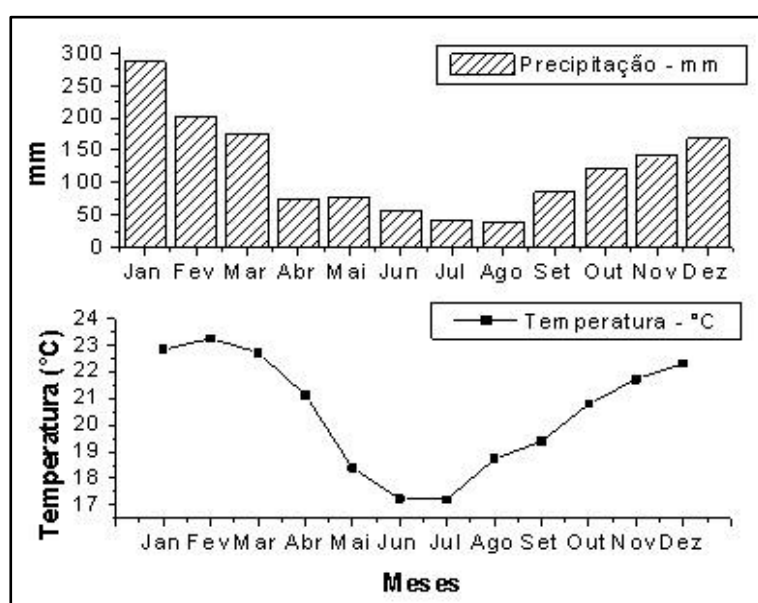
Quanto ao clima desta localidade, e segundo Escobedo et al. (2011), este é temperado quente (mesotérmico), com verão quente e úmido e inverno seco.

A normal climatológica com a média de 40 anos das medidas de temperatura e precipitação para os 12 meses do ano é apresentada na tabela 1e na figura 1 a seguir:

Tabela 1 – Valores de temperatura e de precipitação para a cidade de Botucatu-SP, base de dados com normal climatológica de 40 anos (1971 – 2011)

Dias	Mês	Temperatura média mensal (°C)	Precipitação média mensal (mm)
31	Janeiro	22,82	287
28	Fevereiro	23,24	202
31	Março	22,71	175
30	Abril	21,12	73
31	Maio	18,38	78
30	Junho	17,24	56
31	Julho	17,21	43
31	Agosto	18,73	38
30	Setembro	19,39	85
31	Outubro	20,79	122
30	Novembro	21,71	141
31	Dezembro	22,31	169
Média	---	20,47	122,42
Acumulado	---	---	1469

Figura 1 – Série histórica de temperatura e precipitação para a cidade de Botucau-SP, base de dados de 40 anos (1971 – 2011)



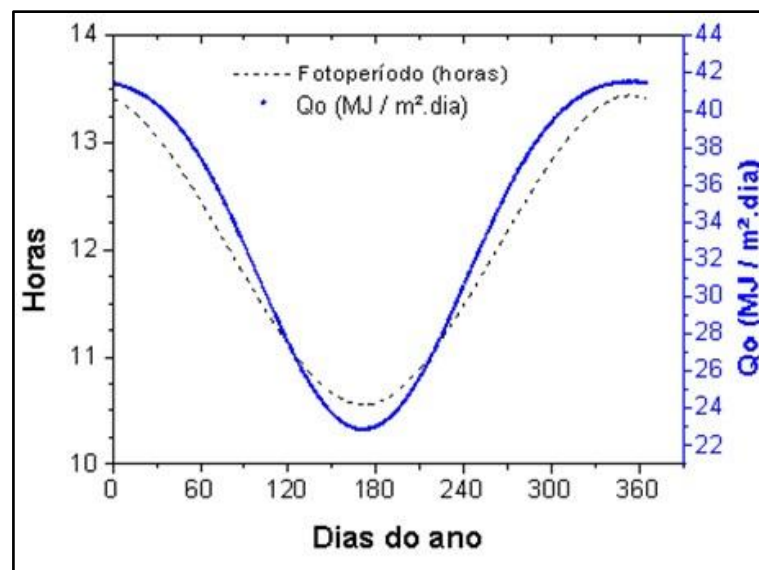
Os meses de janeiro e fevereiro são os mais chuvosos e também os mais quentes do ano. Enquanto que os meses de julho e agosto são os que apresentam menores índices pluviométricos.

Quanto às menores temperaturas os meses de junho e julho recebem destaque sendo os mais frios do ano.

A radiação solar incidente no topo da atmosfera (TERAMOTO e ESCOBEDO, 2012; VAREJÃO-SILVA, 2006; SENTELHAS et al. 2007) foi calculada para a condição de máxima incidência e será apresentada neste trabalho.

A figura 2 apresenta o comportamento da radiação solar ao longo do ano e sua relação com o fotoperíodo na localidade de estudo:

Figura 2 – Fotoperíodo (N) e radiação solar incidente no topo da atmosfera (Q_0) ao longo do ano para a cidade de Botucatu-SP (22°50' S; 48°25' W)



2.4.2 Estimativa da evapotranspiração de referência segundo o modelo de Thornthwaite (1948)

Foi utilizado o modelo de Thornthwaite (1948) para proceder com a estimativa da evapotranspiração de referência.

Descrito conforme apresentado por Sentelhas et al. (2007) o modelo é este que segue:

$$ET_0 = 16 \cdot (10 T_n/I)^a \text{ para: } 0 \leq T_n \leq 26^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$ET_0 = -415,85 + 32,24 T_n - 0,43 T_n^2 \text{ para } T_n > 26^\circ\text{C} \quad (2)$$

Onde: ET_0 (mm/mês): evapotranspiração de referência; T_n ($^\circ\text{C}$): temperatura média do mês (n); a é um coeficiente de ajuste dependente do índice I ; I é um índice que expressa o nível de calor disponível na região onde n é o mês ($n=1$ para janeiro, $n=2$ para fevereiro... $n=12$ para dezembro). O valor de I depende do ritmo anual da temperatura, integrando o efeito térmico de cada mês, calculado pela fórmula:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 T_n)^{1,514} \quad (3)$$

O coeficiente de ajuste a :

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (4)$$

Como neste trabalho foi efetuado o cálculo em escala diária algumas condições de contorno foram tomadas. Primeiramente foi necessário fazer uma correção dos valores inicialmente calculados. Esta correção depende do conhecimento do fotoperíodo para os dias dos quais foram estimados os valores da evapotranspiração de referência segundo o modelo descrito. Isso foi feito como forma de utilizar o exato valor deste parâmetro. Sendo assim a correção necessária a ser feita é apresentada nas seguintes equações:

$$ET_0 = ET_0 \cdot Cor \quad (5)$$

$$Cor = (ND/30) \cdot (N/12) \quad (6)$$

$$ET_0 = ET_0 \cdot Cor. (ND_1/30) \quad (7)$$

$$ET_0 = ET_0 \cdot Cor. (1/30) = ET_0 \cdot Cor. 0,033 \quad (8)$$

Onde: *Cor* é um fator de correção dependente do número de dias (ND) do mês em questão; *N* é o fotoperíodo, neste caso, do dia específico; $ND_1 = 1$, é o número de dias ajustado para um único dia do mês;

Para este trabalho os parâmetros *a* e *I* da equação foram calculados em função dos dados provenientes da normal climatológica.

Com relação aos valores estimados da evapotranspiração de referência, estes foram obtidos analisando a temperatura média diária sendo analisada a forma de estimar este parâmetro do seguinte modo:

- i) Quando observados valores menores ou iguais a 26 °C utilizou-se a equação (1);
- ii) Quando observados valores maiores que 26 °C utilizou-se a equação (2);

O termo *Tn* da equação original, correspondente à temperatura média do mês, foi substituído pela temperatura média diária e logo após isso procedeu-se com a correção apresentada na equação (8) para se obter o valor estimado representativo de um dia de evapotranspiração.

O fator de correção apresentado na equação (6) foi ajustado para cada dia dos meses de análise, pois, este fator é dependente do fotoperíodo. Caso fosse utilizado um valor médio de fotoperíodo este fator seria igual para todos os dias do mês.

Optou-se por agir com esse procedimento, já que, no caso do fotoperíodo, também foram utilizados os valores representativos de cada dia corrido ao invés do valor correspondente do 15º dia do mês, que é considerado como um valor médio pela literatura.

O parâmetro relativo ao número total de dias de cada mês permaneceu sem alterações, sendo utilizado 28 dias para o mês de fevereiro e 30 ou 31 dias para os demais meses do ano.

2.4.3 Medição da evapotranspiração pelo uso da técnica de lisimetria

Para se obter a medida da evapotranspiração com o uso do lisímetro de pesagem levou-se em consideração, neste trabalho, somente o período diurno que compreende do nascer até o pôr do Sol. De uma forma geral do período que compreende das 6 às 18h. Utilizou-se este procedimento em função da forte correlação existente entre a radiação incidente na superfície terrestre, o número de horas de brilho solar e o fotoperíodo para que ocorra o processo pleno de evaporação e transpiração da água pelas plantas. Neste equipamento a quantidade de água evapotranspirada é obtida por meio do balanço entre a água que entrou no sistema, seja por precipitação ou por irrigação e a água que saiu através da evaporação, transpiração e também drenagem profunda. A variação do armazenamento de água (SENTELHAS et al. 2007) no sistema foi obtida considerando os parâmetros da pela seguinte expressão:

$$\Delta ARM = P + I - ET - DP = (P + I) - (ET + DP) \quad (9)$$

Onde: ΔARM é a variação do armazenamento da água no solo medida em milímetros; P é a precipitação medida em milímetros; I é a irrigação em milímetros; ET é a evapotranspiração medida em milímetros; DP é a drenagem em profundidade (percolação profunda) medida em milímetros;

É importante ressaltar que a medida da evapotranspiração foi obtida de forma pontual, devido a ter se considerado o período diurno aquele de maior representatividade da ocorrência deste fenômeno. Sendo assim qualquer ocorrência de precipitação e drenagem durante esse período foram considerados de extrema importância no balanço da variação do armazenamento apresentado na equação (9). Porém aquilo que ocorreu no período noturno foi desconsiderado.

Segundo Schrader et al. (2013) uma equação de balanço de massa pode ser utilizada para indicar as possíveis causas da variação de massa no sistema.

Esta equação é considerada como importante e é complementar à equação da variação de armazenamento de água no sistema.

É válido lembrar que na lisimetria de pesagem o grande interesse é a variação de massa do sistema, e sua leitura em escala milimétrica pode ser convertida em unidades de massa, já que $1 \text{ mm} = 1 \text{ L}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{m}^2 \cong 1 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} / \text{m}^2$.

Esta equação será apresentada a seguir:

$$\Delta M = \Delta M_{\text{LIS}} + \Delta M_{\text{DREN}} \quad (10)$$

$$\Delta P = \begin{cases} \Delta M, & \Delta M > 0 \\ 0, & \Delta M \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta ET = \begin{cases} 0, & \Delta M \geq 0 \\ \Delta M, & \Delta M < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Onde: ΔM_{LIS} é a variação de massa no lisímetro em kg durante um intervalo de tempo; ΔM_{DREN} é a variação do volume drenado em kg; ΔP é a somatória do volume de água em kg de uma determinada precipitação; ΔET é a evapotranspiração media em kg;

2.4.4 Análise estatística dos dados obtidos

Índices estatísticos de comparação entre modelos (STONE, 1993) foram utilizados para quantificar e qualificar os resultados, dos quais são: *Mean Bias Error* e o *Root Mean Square Error*.

Sendo também incluso a análise de variância (ANOVA) com o teste de F-Snedecor e o teste-T de comparação entre médias, o segundo mencionado do qual pode ser feito em função dos índices estatísticos inicialmente apresentados. Esses índices serão descritos a seguir:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_i^n (y_i - x_i) \quad (13)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_i^n (y_i - x_i)^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

$$t = \left(\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Onde: MBE é o *Mean Bias Error*; RMSE é o *Root Mean Square Error*; t é o teste-T(Student) de comparação entre médias para $n-1$ graus de liberdade; y_i representa os valores do modelo a ser testado, x_i os valores do modelo de referência (neste caso os valores medidos) e n é o número de pares de observações;

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais dados do experimento serão apresentados na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Valores de evapotranspiração (ET_0) medida pelo lisímetro e estimada pelo modelo de Thornthwaite (1948) e fatores utilizados para suas determinações no período de análise: medidas de precipitação (P; mm), drenagem em profundidade (DP; mm), irrigação (I; mm), fotoperíodo (N; horas), correção (Cor), variação de massa (ΔM) e temperatura média diária (T.média)

n	*DJ	ET ₀ (mm/dia)		Período (6 – 18 h)			N (horas)	Cor	ΔM	T. média (°C)
		Medida	Estimada	P (mm)	DP (mm)	I (mm)				
1	69	4,00	4,80	0,00	0,205	---	12,3	1,06	< 0	26
2	70	3,95	4,44	0,00	0,147	---	12,2	1,05	< 0	26
3	71	4,37	4,77	0,00	0,133	---	12,2	1,05	< 0	26
4	72	2,40	3,77	0,00	0,102	---	12,2	1,05	< 0	24
5	73	3,43	3,85	0,25	0,084	---	12,2	1,05	< 0	24
6	74	4,13	3,93	0,00	0,070	---	12,1	1,05	< 0	24
7	75	4,64	4,30	0,00	0,060	---	12,1	1,04	< 0	25
8	76	3,96	4,23	0,00	0,044	---	12,1	1,04	< 0	25
9	77	0,00	2,36	1,00	0,040	---	12,1	1,04	> 0	20
10	78	1,57	2,57	0,00	0,030	---	12,1	1,04	< 0	20
11	79	3,58	2,89	0,00	0,021	---	12,0	1,04	< 0	21
12	80	3,99	2,74	0,00	0,014	---	12,0	1,03	< 0	21
13	81	3,90	3,20	0,00	0,005	---	12,0	1,03	< 0	22
14	82	3,60	3,13	0,00	0,000	---	12,0	1,03	< 0	22
15	83	3,60	3,50	0,00	0,000	---	11,93	1,03	< 0	23
16	84	4,10	4,09	0,00	0,000	---	11,9	1,03	< 0	25
17	85	4,20	3,36	0,00	0,000	---	11,9	1,02	< 0	23
18	86	1,37	2,53	0,00	0,000	---	11,9	1,02	< 0	20
19	87	3,72	3,21	0,00	0,000	---	11,8	1,02	< 0	23
20	88	3,80	2,84	0,00	0,000	26,49	11,8	1,02	< 0	21

*DJ: Dia Juliano;

Continuação, tab. 2:

n	DJ	ET ₀ (mm/dia)		Período (6 –18 h)			N (horas)	Cor	ΔM	T. média (°C)
		Medida	Estimada	P (mm)	DP (mm)	I (mm)				
21	89	3,50	2,78	0,00	0,000	---	11,8	1,02	< 0	21
22	90	3,80	2,49	0,00	0,000	---	11,8	1,01	< 0	20
23	91	3,20	2,36	0,00	0,000	---	11,7	0,98	< 0	20
24	92	3,70	2,57	0,00	0,000	---	11,7	0,98	< 0	21
25	93	2,90	2,90	0,00	0,000	18,2	11,7	0,97	< 0	22
26	94	3,60	3,23	0,00	0,000	---	11,7	0,97	< 0	23
27	95	3,20	3,70	0,00	0,000	---	11,7	0,97	< 0	25
28	96	0,00	2,90	4,20	0,000	---	11,6	0,97	> 0	22
29	97	0,10	2,83	0,40	0,000	---	11,6	0,97	< 0	22
30	98	2,45	3,37	0,00	0,651	---	11,6	0,97	< 0	24
31	99	3,47	3,39	0,00	0,326	---	11,6	0,96	< 0	24
32	100	3,83	3,70	0,00	0,267	---	11,5	0,96	< 0	25
33	101	2,97	4,02	0,00	0,226	---	11,5	0,96	< 0	26
34	102	3,07	2,69	0,00	0,130	---	11,5	0,96	< 0	21
35	103	2,84	2,57	0,00	0,060	---	11,5	0,96	< 0	21
36	104	3,45	2,83	0,00	0,049	---	11,5	0,95	< 0	22
37	105	3,66	3,09	0,00	0,040	---	11,4	0,95	< 0	23
38	106	2,77	3,34	0,00	0,030	---	11,4	0,95	< 0	24
39	107	2,08	2,54	0,00	0,021	---	11,4	0,95	< 0	21
40	108	2,89	2,42	0,00	0,014	---	11,4	0,95	< 0	21

Continuação tab.2:

n	DJ	ET ₀ (mm/dia)		Período (6 – 18 h)			N (horas)	Cor	ΔM	T. média (°C)
		Medida	Estimada	P (mm)	DP (mm)	I (mm)				
41	109	3,20	2,35	0,00	0,005	---	11,3	0,95	< 0	20
42	110	2,60	2,84	0,00	0,000	---	11,3	0,94	< 0	22
43	111	0,00	2,11	12,40	7,486	---	11,3	0,94	> 0	19
44	112	2,60	2,05	0,00	2,302	---	11,3	0,94	< 0	19
45	113	2,29	2,21	0,00	0,907	---	11,3	0,94	< 0	20
46	114	2,71	2,40	0,00	0,488	---	11,2	0,94	< 0	21
47	115	2,75	3,14	0,00	0,249	---	11,2	0,93	< 0	23
48	116	0,00	2,29	30,90	17,519	---	11,2	0,93	> 0	20
49	117	2,25	2,34	0,10	1,953	---	11,2	0,93	< 0	20
50	118	2,51	1,64	0,00	0,888	---	11,2	0,93	< 0	17
51	119	2,33	1,81	0,00	0,472	---	11,1	0,93	< 0	18
52	120	2,43	2,14	0,00	0,267	---	11,1	0,93	< 0	20
53	121	2,46	2,21	0,00	0,137	---	11,1	0,96	< 0	20
54	122	2,71	2,40	0,00	0,088	---	11,1	0,95	< 0	20
55	123	2,74	2,67	0,00	0,056	---	11,1	0,95	< 0	21
56	124	0,00	2,69	10,90	0,040	---	11,0	0,95	> 0	22
57	125	0,00	2,19	10,00	8,407	---	11,0	0,95	> 0	20
58	126	2,04	1,83	0,00	2,460	---	11,0	0,95	< 0	18
59	127	1,97	2,17	0,00	0,926	---	11,0	0,95	< 0	20
60	128	2,59	2,39	0,00	0,514	---	11,0	0,94	< 0	20

Continuação tab. 2:

n	DJ	ET ₀ (mm/dia)		Período (6 – 18 h)			N (horas)	Cor	ΔM	T. média (°C)
		Medida	Estimada	P (mm)	DP (mm)	I (mm)				
61	129	2,56	2,25	0,00	0,342	---	11,0	0,94	< 0	20
62	130	1,78	2,38	0,00	0,221	---	10,9	0,94	< 0	20
63	131	1,57	2,17	0	0,133	---	10,92	0,94	< 0	20
64	132	2	1,86	0	0,095	---	10,90	0,94	< 0	18
65	133	2,15	2,21	0	0,054	---	10,89	0,94	< 0	20
66	134	0,86	3,22	0,3	0,044	---	10,87	0,94	< 0	24
67	135	1,87	2,69	0	0,033	---	10,86	0,93	< 0	22
68	136	1,48	2,15	0	0,023	---	10,84	0,93	< 0	20
69	137	1,68	1,94	0	0,016	---	10,83	0,93	< 0	19
70	138	0	2,08	10,6	0,014	---	10,81	0,93	> 0	19
71	139	0	1,58	29,2	29,553	---	10,80	0,93	> 0	17
72	140	1,29	1,67	0	2,514	---	10,78	0,93	< 0	18
73	141	0	2,13	31,2	16,70	---	10,77	0,93	> 0	20
74	142	2,23	1,75	0	3,574	---	10,76	0,93	< 0	18
75	143	1,83	1,99	0	1,067	---	10,74	0,93	< 0	19
76	144	1,45	1,84	0	0,654	---	10,73	0,92	< 0	18
77	145	2,05	2,43	0	0,451	---	10,72	0,92	< 0	21
78	146	2,25	3,03	0	0,147	---	10,71	0,92	< 0	23
79	147	1,56	3,14	0	0,139	---	10,70	0,92	< 0	23
80	148	1,39	2,59	0	0,107	---	10,68	0,92	< 0	22

Continuação tab. 2:

ET ₀ (mm/dia)				Período (6 – 18 h)						
n	DJ	Medida	Estimada	P (mm)	DP (mm)	I (mm)	N (horas)	Cor	ΔM	T. média (°C)
81	149	1,93	2,35	0	0,074	---	10,67	0,92	< 0	21
82	150	1,16	2,54	0	0,044	---	10,66	0,92	< 0	21
83	151	1,87	2,11	0,1	0,035	---	10,65	0,92	< 0	20
84	152	1,93	2	0,1	0,030	---	10,65	0,89	< 0	19
85	153	1,17	1,21	0	0,028	---	10,64	0,89	< 0	15
86	154	1,3	1,34	0	0,023	---	10,63	0,89	< 0	16
87	155	1,91	1,97	0	0,021	---	10,62	0,89	< 0	19
88	156	3,02	3,12	26,9	7,619	---	10,61	0,88	< 0	23
89	157	2,36	2,43	24,9	25,905	---	10,61	0,88	< 0	21
90	158	2,48	2,56	0,5	1,854	---	10,60	0,88	< 0	22
91	159	3,16	3,26	0	1,039	---	10,59	0,88	< 0	24
92	160	2,11	2,18	0,8	0,600	---	10,59	0,88	< 0	20
93	161	1,09	1,13	0	0,377	---	10,58	0,88	< 0	15
94	162	0,94	0,97	0	0,284	---	10,58	0,88	< 0	14
95	163	1,22	1,26	0	0,200	---	10,57	0,88	< 0	16
96	164	1,62	1,68	17,1	0,305	---	10,57	0,88	< 0	18
97	165	1,13	1,17	0,1	2,723	---	10,57	0,88	< 0	15
98	166	1,49	1,54	0	0,984	---	10,56	0,88	< 0	17
99	167	1,61	1,66	0,1	0,633	---	10,56	0,88	< 0	18
100	168	1,64	1,69	0	0,444	---	10,56	0,88	< 0	18
* μ		2.31	2.59	2.12	1.47	22.35	11.24	0.95	---	20.82
* σ		1.19	0.80	6.72	4.66	5.86	0.53	0.05	---	2.64

* μ: média;

* σ: desvio padrão;

Inicialmente serão mencionados nesta parte do trabalho os coeficientes de ajuste da equação de estimativa.

O índice “I” obtido e utilizado apresentou o valor de 101,81 e o coeficiente “a” o valor de 2,23. Lembrando que são valores fixos e foram utilizados para a execução de todos os cálculos de estimativa. Observações importantes serão apresentadas em função destes dados acima descritos. Parâmetros como média e desvio padrão do total dos dados obtidos e apresentados na tabela 2 anteriormente descrita, são indicativos iniciais e muito importantes como parte dos resultados deste experimento. A média dos valores medidos e estimados apresenta valores muito próximos, isso pode implicar em não haver diferença significativa da média entre eles. De uma forma geral, em média, para o período descrito representativo a evapotranspiração de referência da localidade de estudo está na faixa de 2,3 a 3 mm/dia. O desvio padrão observado de 1,19 mm, para as medidas do lisímetro é praticamente o mesmo daquele apresentado na calibração.

Sendo assim este efeito pode ser sistematicamente transferido para as medidas.

A drenagem do sistema como um todo, para o período descrito que compreende das 6 – 18 h apresentou valores médios de 1,47 mm com desvio padrão de 4,66 mm. Isso representa que, salvo as condições de precipitações intensas, e em condições equilibradas de regime de entrada e saída de água no sistema, uma vez o solo em estado de saturação a taxa de água drenada no fundo do tanque será na ordem de 1,47 a aproximadamente 6,13 mm.

Estes valores serão comumente observados após a ocorrência de uma precipitação que possa saturar o solo de água e que, em seguida, haja dois a três dias de tempo limpo, sem outro evento de precipitação.

Outro detalhe importante é que, uma vez saturado o solo e ainda ocorrendo eventos de intensa precipitação o volume drenado observado em relação ao volume precipitado oscilou na faixa de 57 a 84 %, havendo eventos de até 100 %.

Isso reflete uma boa resposta de leitura do sistema e que estes valores são dependentes de características físico-hídricas do solo, principalmente da condutividade hidráulica, que uma vez no estado de saturação demora a se estabelecer.

Sendo incluso que os solos com elevados teores de argila e com indício significativo de grau de compactação apresentam uma baixa taxa de translocação de água ao longo do tempo.

O fotoperíodo médio de 11,24 horas (correspondente a 11h14 minutos) possui sua representatividade, pois, é plenamente de acordo com o período efetivo do processo de evapotranspiração considerado neste trabalho.

O desvio padrão observado de 0,53 horas (correspondente a 31 minutos) indica a oscilação deste parâmetro em função dos dias corridos. O fator de correção médio de 0,95 com desvio padrão de 0,05 também se apresentou adequado e de acordo com aquilo que foi exposto por Thornthwaite (1948).

Este parâmetro possui sua variação em função do fotoperíodo e, consecutivamente, seus valores oscilam em função dos dias corridos.

O indicativo de variação de massa no sistema foi inserido na tabela como forma auxiliar a interpretação da variação da resposta do armazenamento de água. Nem sempre, após uma determinada precipitação, o sistema pode apresentar variação positiva de massa. Isso ocorre quando valores muito pequenos de evapotranspiração são indicados.

Este fenômeno geralmente é observado em dias nublados, com temperaturas amenas e pequenos volumes de entrada de água no sistema. Um exemplo para isto se dá no Dia Juliano 97 quando foram computados 0,10 mm de água evapotranspirada, 0,40 mm de água precipitada durante o período de observação e 22 °C de temperatura média diária.

É interessante esta observação, pois, esses valores geralmente serão encontrados em períodos chuvosos dos quais a entrada de água no sistema não foi o suficiente para suprir a demanda atmosférica.

Salvo esta exceção, eventos de precipitação irão propiciar variações positivas de massa no sistema, indicando reduções significativas de valores de evapotranspiração. Uma vez se tratando da medida, valores nulos puderam ser observados em eventos, geralmente, de intensa precipitação durante o período considerado.

A exceção pode ser observada no Dia Juliano 96 quando medido 4,20 mm de água proveniente de precipitação foi o suficiente para suprir a demanda atmosférica. Isso ocorreu por ter sido um dia nublado, com temperatura média diária de 22 °C e com a verificação de eventos de precipitação ao longo do dia.

No caso da ocorrência plena do processo de evapotranspiração a variação de massa no sistema sempre será negativa.

Quanto à temperatura média diária durante a fase de obtenção de dados, esta se enquadrou no valor indicado pela normal climatológica.

A análise dos dados como um todo, durante o período de medição descrito, rendeu a obtenção de 100 pares de medidas. Sendo assim, compreende-se na análise estatística que há dois tratamentos.

O tratamento 1 (T1) correspondente à medida e o tratamento 2 (T2) correspondente à estimativa da evapotranspiração de referência.

Essas considerações foram importantes para proceder com a avaliação dos pares de médias seja pela análise de variância ou pelos indicativos *Mean Bias Error* e pelo *Root Mean Square Error*.

A tabela 3. apresenta o resultado da análise estatística deste experimento:

Tabela 3 - Resultados da análise estatística e da análise variância de comparação dos pares de médias apresentados no experimento

Causas de Variação	G.L	S.Q	Q.M	*F calculado	F5%	F1%	*Teste-t Calculado	Teste-t 5%	Teste-t 1%
Tratamento	1,00	3,99	3,99	3,88	3.89	6,76	1.00	1,97	2.60
Resíduo	198	203,56	1,03						
Total	199	207,55							

* F: teste F-Snedecor;

* Teste-t: Teste T-Student, em função dos índices estatísticos *Mean Bias Error* e *Root Mean Square Error*;

Os índices estatísticos *Mean Bias Error* e *Root Mean Square Error* apresentaram valores de 0,283 e 2,83, respectivamente.

Segundo Stone (1993) para os dois índices estatísticos quando mais próximo do valor zero melhor a representatividade do modelo em relação à medida.

No caso do *Mean Bias Error* este índice é útil, pois, apresenta-se como uma medida do erro sistemático apresentados dos valores em análise.

No caso do *Root Mean Square Error* este índice é útil, pois, atua como uma medida do desvio médio dos valores reais obtidos, atuando como um indicativo do comportamento do desvio padrão da estimativa em relação à medida. Isso também garante uma comparação pareada dos dados em análise.

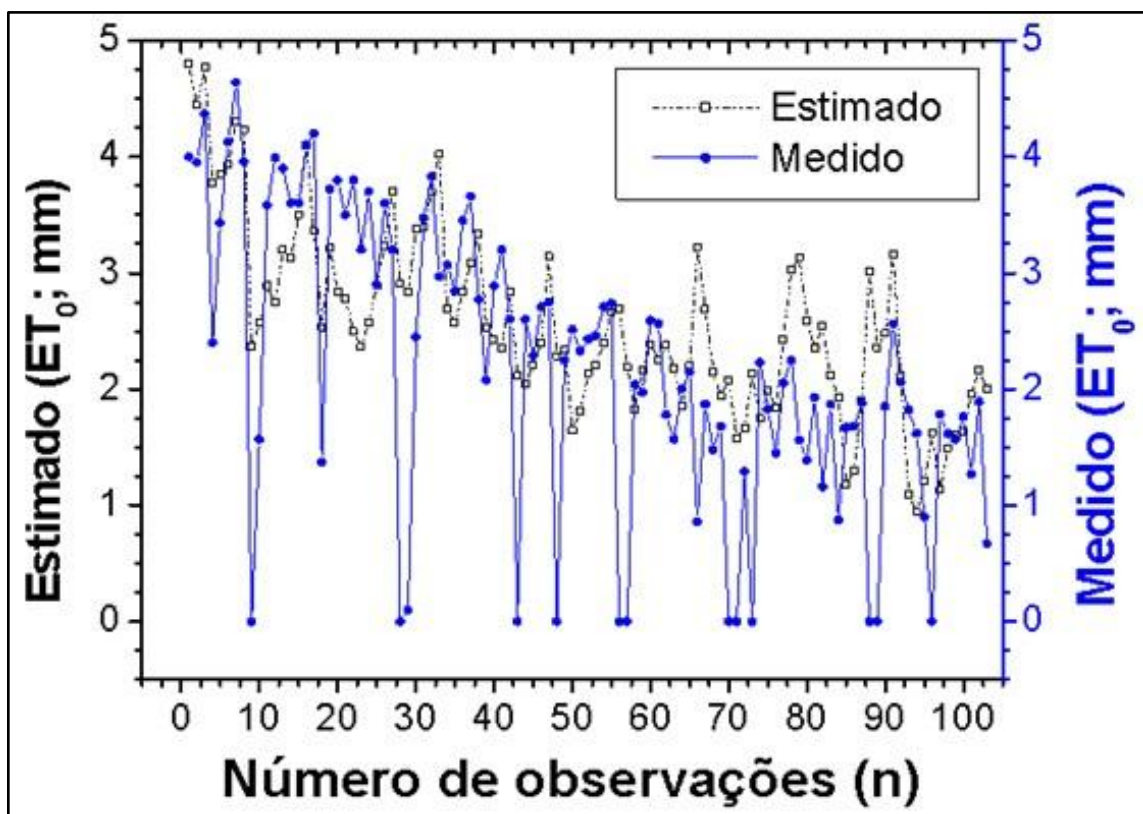
Sendo assim o valor de 0,283 apresentado para o *Mean Bias Error* indica um bom desempenho do modelo em relação aos valores medidos pelo lisímetro.

O valor de 2,83 apresentado para o *Root Mean Square Error* pode ser explicado devido aos valores “nulos” de medida de evapotranspiração, que no caso do modelo, sempre serão indicados valores maiores que zero.

Isto ocorre devido aos parâmetros de ajuste da equação, principalmente à temperatura média diária, que no caso da localidade de estudo jamais será igual a zero.

Para uma melhor interpretação desta análise inicial dos parâmetros estatísticos a figura 3 apresenta o comportamento da variação da evapotranspiração medida em relação à estimada. O gráfico apresentado nesta figura é importante, pois, mostra de forma pareada os dados obtidos em análise:

Figura 3 – Comparação entre os valores de evapotranspiração medidos por lisímetro de pesagem e estimados pelo método de Thornthwaite (1948) em escala diária



Graficamente torna-se possível observar aquilo que os índices estatísticos tentam explicar sobre a análise pareada dos dados obtidos.

O desvio de 2,83 mm apresentado pelo *Root Mean Square Error* também se apresenta como um indicativo da sensibilidade de resposta do equipamento às condições ambientais. Diferentemente do modelo que não possui a capacidade de indicar este tipo de evento.

É importante ressaltar que os valores “nulos” das medidas do lisímetro apresentados neste gráfico foram considerados desta forma devido à baixa demanda atmosférica de água nos dias correspondentes.

Como já mencionado anteriormente, e apresentado na tabela 2, baixos valores de evapotranspiração puderam ser observados em dias que ocorreram intensa precipitação, céu constantemente nublado e temperaturas amenas. Isso garante uma compensação da água que entra e sai no sistema, principalmente devido ao déficit de saturação existente entre a pressão de saturação e a pressão real de vapor de água no ar.

Na realidade, os valores “nulos” foram assim inseridos como uma forma de adequação, pois, nestes dias aquilo que foi medido apresentava-se muito próximo de zero constantemente ao longo do dia.

No caso do teste de comparação entre médias a hipótese nula é de que não haja diferença significativa entre as médias ($H_0: \mu_{T1} = \mu_{T2}$). Para tanto o teste *T-Student* e a Análise de Variância com o teste *F-Snedecor* foram procedidas.

Não houve diferença significativa a 5% e a 1% de significância em ambos os casos, sendo constatado não haver diferença entre as médias.

Sendo assim, em escala diária, para o número de valores observados, os dados apresentados, em média, pelo modelo de estimativa se aproximam da medida obtida pelo lisímetro.

2.6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível apresentar a viabilidade do uso do modelo de Thornthwaite (1948) para a obtenção de dados de evapotranspiração de referência em escala diária.

A metodologia aplicada com o ajuste do parâmetro de correção da equação em função do fotoperíodo para cada dia de análise apresenta melhor funcionalidade ao invés de se utilizar o valor do 15º dia do mês, sendo considerado como um valor médio.

Quanto às medidas do lisímetro de pesagem a observação de valores nulos em dias de intensa precipitação, com temperaturas amenas e cobertura de céu nublado apresenta sua importância, sendo isso motivo de estudos de adequação para os mais diversos tipos de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência.

De outra forma a metodologia de análise dos dados levando-se em consideração a relação entre a variação de armazenamento de água e de massa no sistema apresentou-se útil e deve ser amplamente utilizado em estudos de lisimetria de pesagem.

2.7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, Campinas-SP, 59(2), 125-137, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052000000200002> Acesso em: 08 de Ago. 2014.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 169-178, 2011. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110002740>> Acesso em: 10 de Abr. 2017.

SCHRADER, F.; DURNER, W.; FANK, J.; GEBLER, S.; PÜTZ, T.; HANNES, M.; WOLLSCHLÄGER, U. Estimating precipitation and actual evapotranspiration from precision lysimeters measurements. *Procedia Environmental Sciences* 19, 543-552, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029613003319>> Acesso em: 04 de Out. 2016.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R. Meteorologia Agrícola. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Dpto. Ciências Exatas, Piracicaba-SP, 2007.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar energy*, U.S.A. vol.51, n .4, p.289-291, 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X93901247>> Acesso em: 12 de Ago. 2015.

TERAMOTO, E. T.; ESCOBEDO, J. F.. Evolução diurna e anual da frequência das coberturas de céu em Botucatu/SP. *Energia na Agricultura* (UNESP. Botucatu. Impresso), v. 27, p. 37-52, 2012. Disponível em: <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/419>> Acesso em: 08 de Out. 2017.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, vol. 38, n. 1, p.55-94, 1948. Disponível em: <<http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf>>Acesso em: 18 de Mai. 2017

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Recife-PE, v. digital nº2, 449 p., 2006.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho dois importantes aspectos puderam ser observados. O primeiro aspecto é relativo à construção do equipamento. De suma importância teve a metodologia aplicada na questão da amostragem e recomposição do perfil do solo. A boa resposta de leitura do sistema foi prontamente observada logo após ter passado um curto espaço de tempo de acomodação do solo dentro do container. As medidas apresentadas são equiparáveis com dados apresentados no manual da FAO-56 um dos mais importantes e respeitados livros, atualmente, sobre o assunto na literatura.

O segundo aspecto é sobre a funcionalidade do modelo de Thornthwaite (1948) para estimar a evapotranspiração de referência em escala diária. Certamente há determinados tipos de variações de valores que jamais se aproximarão da medida verdadeira. Mesmo assim, em condições que haja pouca disponibilidade de dados (p. ex. temperatura do ar) é possível de se trabalhar com dados confiáveis, que em muitos casos, se aproximam da real condição dos processos naturais de evaporação e transpiração da água pelas plantas decorrentes no campo.

Muitos estudos podem ainda ser desenvolvidos nesta linha de pesquisa. Diversos são os modelos existentes hoje em dia para estimar a evapotranspiração de referência e ajustes pontuais de modelos, para diversas localidades de estudo podem e devem ser feitos.

Análises deste processo em escala noturna também devem ser efetuadas para que se tenha um melhor esclarecimento sobre eventos de evaporação de água livre do solo no meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO A.; SMITH, M. L. Lysimeters. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 39).

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Dranaige Paper, 56).

BARROS, V. R., SOUZA, A. P. de, FONSECA, D. C., SILVA, L. B. D. da. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. Revista Brasileira de Ciências Agrárias [online], 2009, Abril-Junho. Disponível em <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119017351014>> Acesso 14 de abril de 2015.

CAMPECHE, L. F. M. S. de.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R. de.; AZEVEDO, P. V. de. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.5, p.519-525, 2011. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n5/v15n5a13.pdf>> Acesso em: 14 de Jan. 2015.

CARVALHO, H. P. de.; MELO, B. de.; ATARASSI, R. T.; CAMARGO, R. de.; SILVA, da. C. R.; MORAES, M. R. B. Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café. Biosci. J., Uberlândia, v.29, n.6, p. 1750-1760, 2013. Disponível em <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22303>> Acesso em: 20 de Nov. 2014.

DASTANE, N. G. Effective rainfall in irrigated agriculture. FAO – Irrigation and drainage paper, 1976. Disponível em <<http://www.fao.org/docrep/x5560e/x5560e00.htm>> Acesso em: 10 de Abr. 2017.

FLUMIGNAM, D. L.; FARIA, R. T. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros em fase de formação. Bragantia, Campinas, v.68, n.1, p.269-278, 2009. Disponível em< <http://www.scielo.br/pdf/brag/v68n1/a29v68n1.pdf>> Acesso em: 14 de Jan. 2015.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 478 p., 2002

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. A. C. de.; OLIVEIRA, A. S. de.; GOMES JÚNIOR, J. F.; VELLAME, L. M. Design, installation, and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. Water resources and Irrigation Management, v.2, n.2, p.77-85, 2013. Disponível em: < <https://www2.ufrb.edu.br/wrim/images/wrim-2-2-2013/v02n02a02.pdf>>Acessoem: 20 de Nov. 2014.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R. Meteorologia Agrícola. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Dpto. Ciências Exatas, Piracicaba-SP, 2007.

SOUSA, I. F.; NETTO, A. O. ; CAMPECHE, L. F. M. S. de.; BARROS, A. C.; SILVA, V. P. R. de.; AZEVEDO, P. V. de. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.5, p.526-532, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n5/v15n5a14.pdf>> Acesso em: 14 de Jan. 2015.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Recife-PE, v. digital nº2, 449 p., 2006.

ANEXO – IMAGENS DAS ETAPAS DO PROJETO

ANEXO – IMAGENS DAS ETAPAS DO PROJETO

ANEXO – IMAGENS DAS ETAPAS DO PROJETO

ANEXO – IMAGENS DAS ETAPAS DO PROJETO