

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ANTÔNIO HENRIQUE CARDOSO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LISÍMETRO DE PESAGEM E DETERMINAÇÃO
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO LITORAL DE PERNAMBUCO**

**Recife – PE
Julho de 2014**

ANTÔNIO HENRIQUE CARDOSO DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LISÍMETRO DE PESAGEM E DETERMINAÇÃO
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO LITORAL DE PERNAMBUCO**

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof^a. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro

Co-Orientador: Prof. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

**Recife – PE
Julho de 2014**

ANTÔNIO HENRIQUE CARDOSO DO NASCIMENTO

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LISÍMETRO DE PESAGEM E DETERMINAÇÃO
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO LITORAL DE PERNAMBUCO

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 28 de Julho de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Ph. D. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Prof. Dr. Geber Barbosa Albuquerque Moura
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Prof. Dr. Prof. Luís Fernando de Souza Magno Campeche
Instituto Federal do Sertão Pernambucano – IF-Sertão

Prof. Dr. Ênio Farias França e Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Prof. Dr. João Audifax César de Albuquerque Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

DEDICO

À ciência.

A DEUS pela vida, por iluminar e guiar o meu caminho.

A minha avó materna Marta José Cardoso (in memoriam) pela simplicidade, honestidade e determinação.

Aos meus pais Gerson e Maria Assunção, pela constante dedicação e amizade.

OFEREÇO

A Minha esposa e filha, pela constante dedicação, amizade pelas palavras de incentivo e gesto de compreensão e amor quando era preciso.

AGRADECIMENTOS

Aos Meus pais, tios, irmãos e demais familiares, que foram fundamentais de toda esta obra.

A minha esposa Aline Luz de Oliveira e filha Íris Luz Cardoso do Nascimento por terem suportado minha ausência em momentos importantes, pelas palavras de incentivo e gesto de compreensão quando era preciso.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela oportunidade oferecida para realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

À Coordenação da Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela obtenção de informações para identificação de novas oportunidades, pela comunicação interpessoal e resolução dos problemas dos acadêmicos.

Aos professores Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro e João Audifax César de Albuquerque Filho, pela orientação, ensinando-me a reconhecer limitações e como superá-las. Pelo exemplo de vida, comprometimento, disciplina para alcançar os objetivos. Por todas as oportunidades concedidas e apoio em momentos importantes.

Ào Prof. Dr. Ênio Farias França e Silva, a Prof^a. Dr^a. Lilia Gomes Willadino, a Prof^a. Dr^a. Elvira Maria Regis Pedrosa e a Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida, pelo apoio incondicional prestado, pela amizade e pelo exemplo de competência e comprometimento com o ensino, pesquisa e extensão.

Aos meus vizinhos em nome da família do Sr. Adilson (Danda) e da família do Sr. Fábio pelo amor fraterno concebido a mim e a minha família, pelo incentivo e ombros amigos que nunca nos deixaram faltar.

Aos amigos da Pós-Graduação: Adriano, Alexandre, Betinho, Bianca, Breno, Celestino, Daniel, Eduardo, Gian, Gledson, Guilherme, Igor, Joel, Júlio, Mara, Matheus, Max, Mércia, Raquele, Taciana, Val, Welington e Zezito pelo incentivo, companheirismo e amizade.

Aos grandes amigos Luciano (Capitão), Nadielan e Aldoberison que não mediram esforços em colaborar nos serviços técnicos fundamentais nas atividades de campo.

A todos colaboradores do Departamento de Tecnologia Rural em especial à Lulinha e ao Júnior Granja pelo profissionalismo, dedicação ao trabalho árduo, pelos ensinamentos e principalmente pela amizade.

Muito Obrigado!

“Deus nos fez perfeitos e não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos.”

Albert Einstein

RESUMO

A lisimetria de pesagem é reconhecidamente a melhor técnica para se determinar a evapotranspiração das culturas, sendo adotada como metodologia padrão para servir de referência na avaliação de outros métodos e para calibrar modelos de estimativa da evapotranspiração de diferentes culturas. Neste sentido, objetiva-se com o presente trabalho analisar o desempenho do lisímetro através de calibrações ao longo de um ano, estimativas de erros de medidas e comparação da evapotranspiração de referência (ET_o) medida por lisímetria de pesagem hidráulica com dois sistemas de pesagem: um sistema automatizado e o outro com sistema de leitura manual. A ET_o medida também foi comparada com valores estimados pelos métodos de Penman-Monteith-FAO-FAO, Hargreaves-Samani, Tanque classe A e lisímetro de drenagem em diferentes escalas na região litorânea de Pernambuco. O trabalho foi conduzido em Recife, no campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco (8°01'05" de latitude Sul, 34°56'48" de longitude oeste, com altitude de 6,4m). A variação na ET_o entre os métodos analisados foram realizadas por meio do erro padrão da estimativa e erro médio absoluto para os intervalos horários, diários e quinquenais. Em relação às estimativas dos erros, constatou-se, que os melhores resultados foram obtidos da correlação lisímetro com o sistema de leitura manométrico x método de Penman-Monteith-FAO-FAO, seguido da correlação lisímetro como sistema de leitura pelo transdutor de pressão x método de Penman-Monteith-FAO-FAO. Os valores dos erros de estimativa foram de 0,04 e 0,14 mm hora⁻¹ e de 0,45 e 0,35 mm dia⁻¹, respectivamente, e para o erro médio absoluto foi de 0,03 e 0,11 mm hora⁻¹ e de 0,20 e 0,12 mm dia⁻¹, respectivamente. As equações de calibração apresentaram um coeficiente de determinação de 0,99. O lisímetro de pesagem hidráulica automatizado apresentou excelente estabilidade, sensibilidade, resolução e exatidão, ao longo de um ano, detectando variações de massa devido à chuva, irrigações e evapotranspiração, mostrando-se adequado para o estudo da demanda hídrica, quando comparado com os demais métodos em diferentes escalas de tempo no litoral de Pernambuco.

Palavras chave: evapotranspirômetro, calibração, transdutor de pressão.

ABSTRACT

The weighing lysimeter is recognized as the best technique to determine the evapotranspiration of the crops, being adopted as the standard method in the evaluation of other methods and to calibrate models this variable. In this sense, the objective of the present work is to analyze the performance of a lysimeter through calibrations over a year, estimation of measurement errors and comparison of reference evapotranspiration (ET_o) measured by hydraulic weighing lysimeters with two weighing systems: an automated system and the other with manual reading system. The ET_o measurements were also compared with values estimated by the following methods: Penman-Monteith-FAO, Hargreaves-Samani, class A pan evaporation and drainage lysimeter at different time scales in the coastal region of Pernambuco. The work was conducted at Recife, in the campus of the Federal Rural University of Pernambuco (8°01'05 "south latitude, 34°56'48" west longitude, at an altitude of 6,4m). The analysis of variation in ET_o among methods were made by the standard error of estimate and mean absolute error for hourly, daily and biweekly intervals. From the estimation of the errors, it was found that the best results were obtained from correlation of lysimeter with the manometer reading system x Penman-Monteith-FAO-FAO, followed by the lysimeter by the pressure transducer system x Penman-Monteith-FAO-FAO. The values of the estimation errors were 0,04 and 0,14 mm hour⁻¹ and 0,45 and 0,35 mm day⁻¹, respectively, and the mean absolute errors were 0,03 and 0.11 mm hour⁻¹ and 0,20 mm and 0,12 day⁻¹, respectively. The calibration equations showed a coefficient of determination of 0,99. The automated hydraulic weighing lysimeter showed excellent stability, sensitivity, resolution and accuracy over a year by detecting variations in mass due to rainfall, irrigation and evapotranspiration, being suitable for the study of water demand when compared with other methods at different time scales in the state of Pernambuco.

Keywords: device to measure evapotranspiration, calibration, pressure transducer.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Detalhes da área experimental	38
Figura 2 - Principais componentes de um lisímetro de drenagem.	38
Figura 3 - Principais componentes do lisímetro de pesagem hidráulica.	39
Figura 4 - Mangueiras em nylon para transmissão do fluido entre os travessieiros hidráulicos (A), joelho de saída tipo engate rápido (B), tê tipo engate rápido (C) e sistema de controle geral de fluxo com transdutor de pressão acoplado.....	41
Figura 5 - Sistemas de leituras do lisímetro de pesagem hidráulica: Manômetro com pistão de mercúrio (A), régua inclinada 30° (B), detalhe do transdutor de pressão hidrostática (C) e transdutor de pressão conectado ao datalogger.	42
Figura 6 – Modificações no projeto inicial do lisímetro de pesagem.	43
Figura 7 - Detalhes da calibração no setor central e nos quadrantes pela adição e retirada de pesos padrão.....	46
Figura 8 - Curvas de calibração entre as leituras observadas no manômetro e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) no centro do lisímetro.	57
Figura 9 - Curvas de calibração entre as leituras observadas no transdutor de pressão e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) no centro do lisímetro.....	58
Figura 10 - Relação entre as leituras do transdutor de pressão e do manômetro do mercúrio para carregamento e descarregamento das massas padrão, para o setor central do lisímetro.	59
Figura 11 - Histerese apresentada pela variação de massa de carregamento e descarregamento no manômetro e transdutor de pressão durante as quatro calibrações realizadas no centro do lisímetro durante um ano de avaliação.....	63
Figura 12 – Taxa de variação horária da evapotranspiração de referências medida por lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e	

estimada por Penman-Monteith-FAO, durante o período de 17 a 19 de novembro de 2013.	66
Figura 13 - Comparação do ETo horária medida pelo lisímetro de pesagem com diferentes sistemas de leituras e pelo método de Penman-Monteith-FAO.	67
Figura 14 - Análise de correlação da ETo em escala diária entre o Lisímetro de pesagem com diferentes sistemas de leitura (A), lisímetro de pesagem (manômetro) x Penman-Monteith-FAO (B), lisímetro de pesagem (manômetro) x Hargreaves-Samani (C), lisímetro de pesagem (sensor) x Penman-Monteith-FAO (D), lisímetro de pesagem (sensor) x Hargreaves-Samani (E).	72
Figura 15 - Análise de correlação da ETo em escala quinquenal entre o Lisímetro de pesagem com diferentes sistemas de leitura (A), lisímetro de pesagem (manômetro) x Penman-Monteith-FAO (B), lisímetro de pesagem (manômetro) x Hargreaves-Samani (C), lisímetro de pesagem (sensor) x Penman-Monteith-FAO (D), lisímetro de pesagem (sensor) x Hargreaves-Samani (E).	73
Figura 16 - Correlação entre evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro de pesagem com leitura no manômetro (ETo Lisi. Mano) e evaporação do tanque classe A (ECA).	77
Figura 18 – Análise de correlação da ETo diária entre os lisímetros de pesagem com sistema de leitura manométrico e ETo tanque classe A estimada por diferentes metodologias do Kt.	79
Figura 19 - Análise de regressão da ETo em escala quinquenal entre os lisímetros de pesagem com o sistema de leitura manométrico x lisímetro de drenagem (a) e entre os lisímetros de pesagem com o sistema de leitura com o transdutor de pressão x lisímetro de drenagem (b).	85

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Análise física do solo dos lisímetros até a profundidade de 60 cm.....	43
Tabela 2 - Critérios de interpretação do coeficiente c de Camargo	52
Tabela 3 - Resumo dos coeficientes de calibração (k) e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica ajustados para os dois ciclos de variação de massa lida no manômetro.	60
Tabela 4 - Resumo dos coeficientes de calibração (k) e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica ajustados para os dois ciclos de variação de massa lida no transdutor de pressão.....	60
Tabela 5 - Resumo dos menores valores de leitura, fator de conversão e resolução observadas no manômetro.....	61
Tabela 6 - Resumo dos menores valores de leitura, fator de conversão de resolução observada no Transdutor de pressão.....	62
Tabela 7 - Valores de Acurácia do lisímetro de pesagem determinados por diferentes sistemas de leituras.....	64
Tabela 8 - Resumo médio diário de velocidade do vento, temperatura média, umidade relativa, saldo de radiação e precipitação pluviométrica em Recife-PE, no período de 17 a 19 de novembro de 2013.	65
Tabela 9 – Coeficiente angular (a), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c) para as correlações entre valores horários de ETo do lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e pelo método de Penman-Monteith-FAO.	69
Tabela 10 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c), erro médio absoluto (EMA), erro padrão da estimativa (EPE), para análise de correlação entre valores diários de ETo do lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e pelos método de Penman-Monteit e Hargreaves – Samani.....	74

Tabela 11 - Resumo médio mensal de velocidade do vento, temperatura média, umidade relativa, saldo de radiação e precipitação pluviométrica em Recife-PE, no período de março de 2013 a fevereiro de 2014.	76
Tabela 12 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), erro médio absoluto (EMA), erro máximo absoluto (EMA) e eficiência (EF), para as correlações entre a ETo medida pelo lisímetro de pesagem e a evapotranspiração de referência estimada pelo tanque Classe A (EToTCA) a partir do Kt pelos métodos: Allen, Cuenca, Snyder, Pereira e Kt fixo.	80
Tabela 13 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c), erro médio absoluto (EMA), erro padrão da estimativa (EPE), para as equações de regressão entre valores médios quinquenais de ETo do lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e pelo Lisímetro de drenagem.	86

SUMÁRIO

	Página
1	INTRODUÇÃO 17
2	OBJETIVOS..... 19
2.1	Objetivo geral 19
2.2	Objetivos específicos..... 19
3	HIPÓTESE 20
4	ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 21
4.1	Evolução histórica 21
4.2	Conceitos e definições sobre evapotranspiração..... 22
4.3	Determinação da evapotranspiração 27
4.3.1	Método direto 28
4.3.1.1	Lisímetro..... 28
4.3.1.2	Tipos de lisímetros..... 28
4.3.1.3	Calibração 30
4.3.1.4	Problemas operacionais 31
4.3.1.5	Lisímetro de drenagem 32
4.3.2	Métodos indiretos 32
4.3.2.1	Tanque Classe A – ETo(TQ)..... 32
4.3.2.1	Método de Hargreaves-Samani – ETo(HS)..... 34
4.3.2.2	Método Penman-Monteith-FAO – Eto(PM – FAO) 35
4.4	Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de Referência com lisimetria de pesagem 35
5	MATERIAL E MÉTODOS 37
5.1	Características da área experimental 37
5.1.1	Lisímetro de drenagem..... 38
5.1.2	Lisímetro de pesagem 39
5.1.3	Caracterização física do solo dos lisímetros e Teor de umidade no solo 43
5.1.4	Coleta de dados agrometeorológicos 44
5.2	Variáveis analisadas..... 44
5.2.1	Avaliação do desempenho do lisímetro de pesagem hidráulica..... 44

5.2.2	Comparação da ETo na região litorânea entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com sistemas de leituras manométrico e por intermédio do transdutor de pressão e métodos indiretos em escala horária, diária e quinquenal.	48
5.2.2.1	Cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) pelo lisímetro de pesagem hidráulica	48
5.2.2.1	Métodos indiretos para estimativa da ETo	50
5.2.2.2	Índices estatísticos para desempenho dos métodos de determinação da evapotranspiração.....	51
5.2.2.3	Comparação da evapotranspiração de referência medidas com lisímetro de pesagem com valores estimados a partir de dados do tanque Classe A utilizando-se diferentes métodos de determinação do Kt em escala diária	53
5.2.3	Avaliação comparativa dos aspectos construtivos, econômicos e de manejo dos lisímetros de pesagem hidráulica e de drenagem.	55
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6.1	Coeficiente de calibração, estabilidade e precisão do lisímetro.	57
6.2	Comparação da ETo na região litorânea entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com diferentes sistemas de leituras e o método de Penman-Monteith-FAO em escala horária.....	64
6.3	Comparação da ETo na região litorânea entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com diferentes sistemas de leituras, e métodos indiretos em escala diária e quinquenal.	69
6.4	Comparação da evapotranspiração de referência medidas com lisímetro de pesagem com valores estimados a partir de dados do tanque Classe A utilizando-se diferentes métodos de determinação do coeficiente do tanque (Kt)	75
6.5	Avaliação comparativa dos aspectos construtivos e de manejo dos lisímetros de pesagem hidráulica e de drenagem.....	80
7	CONCLUSÕES	87
8	RECOMENDAÇÕES.....	88
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	APÊNDICES	101

1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência (ET_o), originalmente introduzida sob o termo evapotranspiração potencial (ET_p), é uma importante variável agrometeorológica, principalmente para planejamento e manejo de irrigação, mas, também, é considerada elemento climático de demanda hídrica, daí sua aplicação em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos.

Existem diversos métodos para a estimativa da ET_o, dentre eles os métodos diretos e os indiretos. Para estes existem desde aqueles mais simples, com base puramente empírica, até aqueles que apresentam embasamento físico consistente sobre o fenômeno. Contudo, há sempre algum empirismo presente. Esta diversidade de métodos ocorre devido à complexidade da transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, aos diferentes climas presentes no mundo e à dificuldade de obtenção dos elementos meteorológicos necessários para a alimentação destes métodos.

A lisimetria, seja por dispositivos pesáveis e não pesáveis, é reconhecidamente a melhor técnica para se determinar a evapotranspiração das culturas, sendo adotada como metodologia padrão para servir de referência na avaliação de outros métodos e para calibrar e validar modelos de estimativa da evapotranspiração de diferentes culturas.

Os lisímetros de pesagem são equipamentos precisos devido ao grande aparato tecnológico, verificados principalmente naqueles equipados eletronicamente, que dependendo do modelo, tornam-se, em alguns casos, economicamente inacessíveis para uso em muitos projetos de pesquisa que demandem dados diários. Entretanto, a utilização de lisímetros com sistema de pesagem hidráulica tem sido uma alternativa viável, uma vez que seus custos monetários são menores, pode-se armazenar e processar os dados como nos lisímetros de pesagem eletrônicas, além de oferecer uma resolução de leitura satisfatória, podendo detectar valores de lâmina evapotranspirada de 0,50 mm.

O desenvolvimento e montagem de lisímetros de pesagem com os mais variados tipos, tamanhos e materiais tem sido reportados em estudos na área de manejo da irrigação, hidrologia e, principalmente, a micrometeorologia. Na literatura não se encontra referência a um lisímetro padrão, com tamanho, forma, diâmetro ou massa pré-estabelecida. Assim, uma análise crítica de lisímetros dos mais variados

tamanhos e mecanismos de pesagem deve ser realizado para que os erros possam ser conhecidos e quantificados, garantindo a qualidade dos dados de evapotranspiração.

Outro passo importante antes do funcionamento de lisímetros de pesagem em campo é a calibração, que tem por finalidade estabelecer uma relação entre o sinal de saída da célula de carga (geralmente expresso em mV) e a massa do sistema. Com a calibração, verifica-se a linearidade e histerese da célula de carga.

Conforme salientam Farahani et al. (2007), como existem muitas fontes potenciais de erros inerentes à metodologia, é importante saber quando confiar e duvidar dos dados obtidos nos lisímetros. Os erros relacionados ao sistema de pesagem podem estar associados às células de carga, aos cabos, ao sistema de coleta de dados e a própria estrutura a ser pesada. E estes, somente podem ser devidamente avaliados após a realização da calibração e testes.

Sendo assim, antes e durante a utilização dos lisímetros de pesagem para estudar o consumo hídrico de uma cultura, torna-se conveniente promover alguns testes, além de se comparar os valores de ETo obtidos por este método, com outros métodos consagrados para que se permita conhecer melhor o equipamento, fornecendo dados confiáveis em curtos intervalos de tempo. Este procedimento aumenta o poder de decisão sobre quais dados são úteis e quais devem ser corrigidos ou, até mesmo, excluídos.

De fato, os estudos de evapotranspiração por diferentes metodologias devem reconhecer e considerar de forma exata e eficiente as diversidades climáticas regionais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo geral analisar o desempenho do lisímetro de pesagem hidráulica automatizada por meio de calibrações, estimativas de erros de medidas e comparação da evapotranspiração de referência estimada com diferentes métodos em diferentes escalas de tempo no litoral do Estado de Pernambuco.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica em função de calibrações ao longo do ano e estimativas de erros de medidas;
- Comparar a ETo na região litorânea entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com os sistemas de leituras manométrico e transdutor de pressão, com métodos de Penman-Monteith-FAO-FAO, Hargreaves-Samani e Tanque classe A indiretos em escala horária, diária e quinzenal.
- Comparar a evapotranspiração de referência medidas com lisímetro de pesagem com valores estimados a partir de dados do tanque Classe A utilizando-se diferentes métodos de determinação do coeficiente do tanque (Kt) em escala diária.
- Avaliar comparativamente os aspectos construtivos e de manejo dos lisímetros de pesagem hidráulica automatizada e de drenagem.

3 HIPÓTESE

O lisímetro de pesagem hidráulica automatizado calibrado e recalibrado ao longo do ano na região litorânea de Pernambuco medirá representativamente a evapotranspiração de referência, quando comparado com os demais métodos em diferentes escalas de tempo.

4 ESTADO DA ARTE E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Evolução histórica

A evapotranspiração é um termo bastante estudado devido a sua importância meteorológica e/ou agrometeorológica. As suas teorias foram evoluindo gradativamente. As primeiras citações se deram no início do século XIX. Posteriormente, se deu através dos trabalhos realizados por Thornthwaite (1948), o fenômeno chamado de evapotranspiração potencial, considerado como: a perda máxima de água em uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberta com vegetação, em fase de desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes, de modo a minimizar os efeitos de energia advectiva local. Se algumas dessas condições não fossem atendidas, ter-se-ia a evapotranspiração real. E quase que simultaneamente, Penman (1948), na Inglaterra, também definiu a evapotranspiração potencial (ETP) como o processo de transferência d'água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo, ressaltando que a vegetação deveria ser rasteira e com altura uniforme. De um modo geral, a grama foi tomada como padrão, em razão da sua utilização nos postos meteorológicos (PEREIRA et al., 1997).

Essa definição foi muito utilizada até que surgiu a necessidade de um conceito mais geral para o termo evapotranspiração, dada às diferenças entre as culturas utilizadas, mesmo se tratando de variedades de grama, no conceito da referida variável.

Diversos trabalhos foram publicados posteriormente relacionados ao requerimento de água pelas culturas, merecendo destaque os seguintes: a) a primeira edição do Manual 70 da ASCE (American Society of Civil Engineers) publicado em 1974, b) o Boletim 24 da FAO publicado por Doorenbos & Pruitt (1977), que teve como objetivo de orientar os pesquisadores com relação à determinação do requerimento de água pelas culturas, c) a segunda edição do Manual 70 da ASCE publicada após várias revisões, por Jensen et al. (1990), d) a revisão proposta por especialistas realizada pela FAO e outros órgãos ligados à área (Smith, 1991); e) último Boletim da FAO número 56 (ALLEN et al., 1998).

4.2 Conceitos e definições sobre evapotranspiração

Segundo Raudkivi (1979), a evapotranspiração assume papel importante no ciclo hidrológico, sendo responsável pelo retorno à atmosfera de aproximadamente 70% da precipitação anual na superfície terrestre, representando assim uma parcela significativa nos estudos de balanço hídrico e nos projetos de recursos hídricos. Informações quantitativas deste processo podem ser utilizadas na resolução de numerosos problemas que envolvem o manejo da água. Tanto para o planejamento de áreas agrícolas irrigadas, quanto para a previsão de cheias ou a construção de reservatórios, são requeridos dados confiáveis de evapotranspiração (MORAES, 2007). Contudo, para a avaliação do balanço hídrico de uma região, se faz necessário o conhecimento dos diferentes conceitos de evapotranspiração:

Evapotranspiração Potencial (ETp):

Termo introduzido por Thornthwaite (1948) referindo-se ao processo de perda máxima de água para a atmosfera pela ocorrência simultânea dos processos de transpiração e evaporação, através de uma superfície natural gramada, padrão, sem restrição hídrica, e em crescimento ativo (PEREIRA et al., 1997; TOMASELLA e ROSSATO, 2005). Mais tarde, Penman (1956) adotou o conceito de evapotranspiração potencial como sendo a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo e de área, por uma cultura de porte baixo (vegetação rasteira), verde, de altura uniforme e sem deficiência hídrica, que cobre totalmente a superfície do solo (SEDIYAMA, 1996; REICHARDT e TIMM, 2012).

Camargo & Camargo (2000) classificaram da seguinte forma o trabalho destes dois pesquisadores: o trabalho de Thornthwaite foi uma pesquisa analítica, empírica e fundamentada na análise dos fatos, enquanto Penman fez uma abordagem sintética, científica e firmada no conhecimento físico que rege o fenômeno.

De acordo com Sedyama (1996), Thornthwaite tinha a preocupação de explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentar definir as diferenças regionais do clima. Por esta razão, este método é apenas uma função da temperatura média do ar e da duração do dia, em média mensal. Penman preocupou-se com os processos físicos envolvidos na evaporação e com o desenvolvimento de um método, que, a partir de elementos meteorológicos,

expressasse a estimativa da taxa de evaporação da água em contato livre com a atmosfera, da umidade da superfície do solo e da vegetação.

Tucci (2007) define evapotranspiração potencial (ETp) como a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água

Evapotranspiração Real (ETr):

Quando a umidade no solo é suficiente, a evapotranspiração potencial depende apenas do suprimento de energia solar. Quando a umidade do solo diminui, a evapotranspiração é reduzida, e passa a ser caracterizada como evapotranspiração real (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

A evapotranspiração real corresponde à quantidade de água realmente utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, porém, com ou sem restrição hídrica, podendo a evapotranspiração real ser igual ou menor a evapotranspiração potencial (UNESCO, 1982; TUCCI, 1993; SENTELHAS et al., 1999). Pode-se ainda dizer que a evapotranspiração real é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, independente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo, ocorrendo em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno (PEREIRA et al., 1997; TOMASELLA e ROSSATO, 2005). Para Pereira et al. (2002) evapotranspiração real corresponde a quantidade de água realmente utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com ou sem restrição hídrica. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial, sendo um caso especial da evapotranspiração e ocorre em qualquer circunstancia, sem imposição de qualquer condição de contorno (BATTISTON & TUCCI, 2003).

Tucci (2007) define evapotranspiração real (ETr) como quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial.

Evapotranspiração de Oásis:

O oásis é uma região vegetada em meio a um grande deserto, ou seja, é uma pequena área com umidade disponível circundada por extensa área seca. No caso da evapotranspiração, define se a condição de oásis quando uma pequena

área irrigada está rodeada por área seca ou quando a área tampão não é suficiente para eliminar os efeitos advectivos do calor sensível (PEREIRA et al., 1997). É a taxa de evapotranspiração de uma cultura qualquer sem enfermidades, em solo fértil, com crescimento em vasta região e sob condições climáticas e hídricas ótimas (ALLEN et al., 1998).

Evapotranspiração de Referência (ET_o):

Termo inicialmente introduzido por Jensen et al. (1971), a evapotranspiração de referência representa uma extensão da definição original de Penman (1956). No entanto, somente depois da adoção do boletim FAO-24 elaborado por Doorenbos e Pruitt (1977) é que tal definição se popularizou. Assim, estes autores definiram a evapotranspiração de referência como sendo a evapotranspiração de uma área com vegetação rasteira (grama), em crescimento ativo, mantida a uma altura uniforme de 0,08 a 0,15 m de altura e bem adaptada às condições locais. Jensen et al. (1990) definem ET_o como sendo a taxa com que a água, se disponível, seria removida da superfície do solo e de uma planta específica, arbitrariamente chamada de cultura de referência. Essa variável expressa como a taxa de troca de calor latente por unidade de área ou lâmina de água evaporada. Definição semelhante é apresentada por Sentelhas (2001), na qual a ET_o é a taxa de evapotranspiração que ocorre em uma superfície de referência (padrão), definida como sendo uma extensa superfície vegetada com grama, com altura entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo (índice de área foliar igual a 2,88), cobrindo totalmente a superfície do solo e bem suprida de água. Nessas condições, a ET_o constitui uma variável climática que expressa o poder evaporante da atmosfera em um determinado local, em cada época do ano, sem levar em consideração fatores do solo e da planta. Smith (1991) definiu a ET_o como sendo aquela que ocorre em uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência do dossel ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m⁻¹, que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem falta de água.

O mais recente conceito de evapotranspiração de referência foi proposto por Allen et al. (1998) no Boletim nº 56 da FAO, definindo-a como sendo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12m, albedo igual a 0,23, e resistência da superfície ao transporte de vapor d'água igual a 70s m⁻¹. A cultura hipotética está relacionada a uma superfície gramada, de altura uniforme,

possuindo em torno de 3m² de índice de área foliar (IAF) por m² de terreno ocupado, assemelhando-se a uma superfície verde, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrição hídrica.

Evapotranspiração de cultura:

A determinação da evapotranspiração de cultura ET_c é fundamental para o adequado manejo de projetos de irrigação, pois esta representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais (PEREIRA et al., 1997).

A evapotranspiração de cultura é dada pelo produto da evapotranspiração de referência pelo coeficiente de cultura. Este último depende do tipo de cultura e de seu estágio fenológico.

$$ET = k_c \times ET_o \quad (01)$$

em que ET_c é a evapotranspiração de cultura (mm dia⁻¹);

k_c é o coeficiente de cultura e;

ET_o a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹).

A evapotranspiração da cultura pode ser estimada a partir da ET_o, refere-se a evapotranspiração de uma área com vegetação rasteira, na qual são feitas as medições meteorológicas, para obtenção de um conjunto consistente de dados de coeficientes de cultura (K_c), para serem utilizados na determinação da evapotranspiração de outras culturas agrícolas (FRANCO et al., 2007).

Na elaboração de um projeto de irrigação, é frequente usar a estimativa da evapotranspiração de referência, calculada a partir dos dados climáticos da região; assim estimada é então relacionado por um coeficiente relativo à cultura em questão, o coeficiente de cultura, obtendo-se a evapotranspiração da cultura (DOORENBOS & PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998). Para se determinar a quantidade de água a ser aplicada na irrigação, deve-se conhecer a evapotranspiração da cultura (ET_c), que engloba a evapotranspiração de referência, ou seja, a ET_c é determinada multiplicando-se a evapotranspiração de referência da região pelo coeficiente da cultura, denominado K_c (CONCEIÇÃO, 2005).

Para atender às reais necessidades hídricas de uma cultura através de reposição da água ao solo, é necessário conhecer a evapotranspiração da cultura ou evapotranspiração máxima como definida por Doorenbos & Kassam (1994). Durante o seu estágio de desenvolvimento, isto é, desde o plantio até a colheita, a cultura vai progressivamente crescendo e ocupando a área disponível do solo, ocorrendo,

nestas condições, a evapotranspiração da cultura (PEREIRA et al., 1997). A evapotranspiração da cultura (ETc) pode ser obtida a partir da evapotranspiração de referência (Eto) empregando-se um fator de correção que é o coeficiente de cultura (Kc). Esse coeficiente varia com a cultura, estágio de desenvolvimento e o método de estimativa de Eto (BARBIERI, 1981; PERES et al., 1992).

Evapotranspiração do cultivo sob condição padrão (ETc):

A evapotranspiração do cultivo sob condição padrão, ou simplesmente evapotranspiração do cultivo (ETc), corresponde a evapotranspiração de um cultivo qualquer que se encontra livre de pragas e doenças, com boa fertilização, cresce em grandes áreas sob condições ótimas de solo e água, e que atingem a máxima produção nas condições climáticas em que está inserido (ALLEN et al., 1998).

A ETc pode ser calculada a partir de dados meteorológicos e integrando diretamente os fatores da resistência do cultivo, albedo e resistência do ar dentro do enfoque da equação de Penman-Monteith-FAO. Porém, ainda existe uma considerável falta destas informações para os diferentes cultivos, fato que implica na utilização do método de Penman-Monteith-FAO apenas para estimar os valores de ETo (ALLEN et al., 1998).

Evapotranspiração do cultivo sob condição não padrão (ETc aj):

A evapotranspiração do cultivo sob condição não padrão (ETc aj) se refere à evapotranspiração de cultivos que crescem sob condições ambientais e de manejo diferentes daquelas preconizadas para a condição padrão (ALLEN et al., 1998). No campo, a evapotranspiração real do cultivo pode ser diferente da ETc devido a ocorrência de condições não ótimas como, por exemplo, a presença de pragas e doenças, a salinidade do solo, a baixa fertilidade do solo e, também, o déficit ou excesso hídrico. Essas condições podem resultar na inibição do crescimento das plantas e, por consequência, reduzir a taxa de evapotranspiração observada para valores abaixo dos previstos para a ETc (ALLEN et al., 1998).

Evapotranspiração Máxima:

Para Pereira et al. (1997) o termo evapotranspiração máxima tem significado vago, pois para Tanner e Jury (1976) corresponde à condição potencial (EP), enquanto que para Doorenbos & Kassam (1994) representa a evapotranspiração da cultura (ETc), e para Villa Nova e Richardt (1989) essa é a

condição de Oásis. Portanto, é conveniente evitar um termo que tem diferentes significados, pois seu uso só traz confusão.

4.3 Determinação da evapotranspiração

A determinação da evapotranspiração pode ser feita por meio de métodos diretos (lisímetros, parcelas experimentais, controle de umidade dos solos e métodos de entrada e saída) e métodos indiretos (evaporímetros, equações empíricas baseadas na temperatura, radiação, métodos combinados, dentre outros) (SALASSIER et al., 2008).

Segundo Pereira et al. (1997), a medida direta da evapotranspiração é extremamente difícil e onerosa, devido às exigências de instalações e equipamentos especiais. Neste caso, recomenda-se o uso de estimativas oriundas de modelos físicos ou empíricos (TUCCI, 1993), com destaque para o modelo de Thornthwaite, pela facilidade dos cálculos; e o modelo de Penman-Monteith-FAO, pela precisão dos resultados (PEREIRA et al., 1997). Berlato e Molion (1981) salientam que no momento da escolha de um método para a determinação da evapotranspiração deve-se considerar a praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, eles apresentam algumas limitações, o que pode restringir a sua utilização.

Segundo Carvalho e Stipp (2004), o critério para adoção de um dos diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração baseia-se na dependência de uma série de fatores, dentre eles, a disponibilidade de dados meteorológicos, a escala de tempo requerida, além das condições climáticas para as quais o método foi desenvolvido. Sedyama (1996) ressalta que o método ideal deve incorporar todos os fatores que influenciam na evapotranspiração, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, as condições de solo, e as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferências de energia e massa.

Os modelos matemáticos são também empregados na comparação entre dados medidos e simulados, como forma de se buscar um método de avaliação que represente da melhor forma possível o que ocorre na natureza. Por meio desses modelos, efetua-se o acompanhamento dos parâmetros naturais de forma simples e

a baixo custo, além da possibilidade de simular panoramas futuros, o que é fundamental no que se refere à gestão dos recursos hídricos (LIMA et al., 2001).

Em análise quantitativa, a evapotranspiração tem sua determinação baseada em métodos diretos e métodos indiretos.

4.3.1 Método direto

4.3.1.1 Lisímetro

Em sua clássica literatura sobre lisimetria, Aboukhaled et al. (1982) fazem vasta referência sobre a classificação, projeto, construção e operacionalização de lisímetros. Os mesmos autores definem os lisímetros como grandes “containers” preenchidos com solo (ou incluso um bloco de solo) localizados no campo, para representar o ambiente local, com superfície vegetada ou em solo nu, para determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento, ou de uma cobertura vegetal de referência ou, ainda, da evaporação a partir de um solo não vegetado.

Para Salassier et al. (2008), o lisímetro deve ser suficientemente profundo, de modo que evite restringir o desenvolvimento do sistema radicular das plantas nele cultivadas, as condições físicas do solo dentro do lisímetro precisam aproximar-se, tanto quanto possível, das condições do solo que lhe fica externo; e deve-se controlar o lençol freático dentro dele, de modo que não torne as condições de umidade interna diferente das do solo externo, a vegetação plantada dentro do lisímetro deve ser da mesma espécie, altura e densidade externa. Para eles a vegetação plantada dentro do lisímetro deve ser da mesma espécie, altura e densidade da vegetação externa, não devendo colocá-lo dentro de uma área sem vegetação.

4.3.1.2 Tipos de lisímetros

Existem diferentes tipos de lisímetros que podem ser utilizados nos estudos de evapotranspiração, os quais apresentam suas vantagens e desvantagens, mas que oferecem diversas soluções técnicas para a atividade fim do estudo (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982).

Os lisímetros podem ser classificados em dois tipos distintos, considerando-se a maneira que a variação do conteúdo de água no solo é determinada: os de pesagem e os não pesáveis, também conhecidos por lisímetros de drenagem ou percolação. Os lisímetros não pesáveis permitem determinar a evapotranspiração para um dado período de tempo, por meio da diferença entre o volume total de água drenado e o que entrou no sistema. Já para o caso dos lisímetros de pesagem, a evapotranspiração, bem como os outros componentes do balanço hídrico, pode ser determinada por meio do monitoramento da variação de massa do lisímetro (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL; SCHNEIDER; JENSEN, 1991; HOWELL, 2004).

Para Farahani et al. (2007) e Bryla, Trout e Ayars (2010), a lisimetria de pesagem é reconhecidamente a melhor técnica para se determinar a evapotranspiração. Estes envolvem vários equipamentos e princípios de pesagem, podendo utilizar desde sistemas mecânicos, eletrônicos ou diretos (baseados na utilização de células de carga), sistemas hidráulicos (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL, 2004) e mistos (mecânico combinado com eletrônico (FLUMIGNAN, 2011; SCHMIDT et al., 2013) ou sistemas hidráulicos com eletrônico (SILVA, 2005; LIMA et al., 2013).

Conforme Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982), Allen et al. (1998), Howell (2004) e Allen et al. (2011), os lisímetros de pesagem do tipo misto e eletrônicos produzem medidas satisfatórias da evapotranspiração em curtos intervalos de tempo (por exemplo, escala horária ou até quinze minutos). Para Howell (2004) e Allen et al. (2011), a qualidade das medidas de evapotranspiração depende em grande parte da resolução do sistema de pesagem, da faixa de medição do mesmo, da existência ou não de contrapesos e da relação área/volume do lisímetro.

Embora sejam ótimas ferramentas para o estudo da evapotranspiração, segundo Allen et al. (1998), o custo e a necessidade de profissionais especializados para sua operação e análise dos dados limita o uso destes equipamentos somente nas atividades voltadas a pesquisa.

Nos lisímetros de pesagem do tipo misto, a variação de massa do lisímetro é determinada eletronicamente utilizando células de carga. Porém, antes que toda a massa do lisímetro seja transferida para a célula de carga, a sua massa é aliviada por meio de um sistema mecânico de redução, o qual pode ser composto por um conjunto de alavancas e contrapesos, que reduzem a massa a ser

descarregada na célula de carga (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL, 2004). Segundo Howell (2004), nesse sistema a “massa morta” (massa de solo seco, somada a do tanque) é tarada estaticamente, o que permite que uma célula de carga de pequena ou média capacidade seja utilizada para monitorar a variação da “massa viva” (água).

Ainda segundo este autor, alguns lisímetros possuem contrapesos móveis, os quais podem ser utilizados para ajustar a tara e permitir a manutenção de uma pequena faixa de medição. Para Howell (2004), os sistemas mistos permitem obter medidas bastante acuradas da evapotranspiração, sendo frequentemente encontradas acurácias entre 0,05 e 0,02 mm. Para Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982), boas acurácias da ordem de 0,1 a 0,025 mm podem ser obtidas com este tipo de equipamento.

Segundo Allen e Fisher (1991), nos lisímetros de pesagem do tipo eletrônico, também conhecidos como lisímetros de pesagem direta, a variação de massa do lisímetro é determinada eletronicamente utilizando células de carga que suportam diretamente toda a massa do mesmo. Nesse sistema não existem alavancas, nem contrapesos. Portanto, faz-se necessária a utilização de mais de uma célula de carga e estas devem ser distribuídas uniformemente, de tal forma que a massa do lisímetro seja bem distribuída entre as células e não ocorram excessos de carga localizados. Além disso, a capacidade combinada das células (somatório da capacidade de cada célula) deve ser superior à massa total do lisímetro. Howell (2004) acredita que, se forem utilizados datalogger de alta precisão e lisímetros com maior relação área/massa, medidas de evapotranspiração com acurácia de 0,1 a 0,05 mm podem ser obtidas.

4.3.1.3 Calibração

Depois de finalizada a sua construção, os lisímetros de pesagem precisam ser calibrados antes de utilizados (HOWELL et al., 1995; CAMPECHE, 2002; TOLK; HOWELL; EVETT, 2005; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006; MAREK et al., 2006; EVETT et al., 2009; CAMPECHE et al., 2011; FLUMIGNAN, 2011; SCHMIDT et al., 2013; LIMA et al., 2013).

Segundo Campeche (2002), a calibração é uma das etapas mais importantes da implantação do equipamento, pois calibrações mal feitas levam a

interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração, principalmente, quando se trabalha em curtos períodos de tempo.

Segundo Howell et al. (1995), Campeche (2002) e Evett et al. (2009), o procedimento de calibração consiste da adição e retirada de massas conhecidas nos lisímetros, enquanto é feito o monitoramento da variação do sinal de saída do sistema de pesagem. Durante a calibração a superfície do solo deve ser mantida coberta para minimizar as perdas por evaporação. Assim, de posse dos pares de dados (massa x sinal) realiza-se uma análise de regressão, onde se considera o sinal do sistema de pesagem como variável independente (x) e a massa como dependente (y). Desta forma, a equação obtida no ajuste do modelo pode ser posteriormente utilizada para determinar a massa dos lisímetros em tempo real, utilizando-se como entrada o sinal fornecido pelo sistema de pesagem, composto pela célula de carga hidráulica acoplada a um sistema de leitura.

A calibração também é útil para verificar a linearidade de resposta da célula de carga, testar a sua histerese (baseado no carregamento e descarregamento das massas) e avaliar a acurácia do lisímetro, a qual pode ser relacionada ao erro padrão da estimativa do modelo de regressão (HOWELL et al., 1995; CAMPECHE, 2002; EVETT et al., 2009).

4.3.1.4 Problemas operacionais

Conforme salientam Farahani et al. (2007), como existem muitas fontes potenciais de erros inerentes à metodologia, é importante saber quando confiar e duvidar dos dados obtidos nos lisímetros. Os erros relacionados ao sistema de pesagem podem estar associados às células de carga, aos cabos, ao sistema de coleta de dados e a própria estrutura a ser pesada, e estes somente podem ser devidamente avaliados após a realização da calibração e testes (GOMMOLA, 2000).

De fato, mesmo depois de calibrados, os lisímetros de pesagem podem ter suas medições influenciadas por fatores externos, dentre os quais se destacam a temperatura do ar e o vento. Devido ao grande aporte de componentes eletrônicos envolvidos, a variação da temperatura do ar pode introduzir significativa incerteza sobre as medições obtidas (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; ALLEN; FISHER, 1991, FLUMIGNAN, 2011). Além da temperatura, a ocorrência de ventos pode promover vibrações nos lisímetros que também introduzem incertezas nas

medições (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL et al., 1995; MALONE et al., 1999; CAMPECHE, 2002; PEREIRA et al., 2002; VAUGHAN; AYARS, 2009, FLUMIGNAN, 2011).

Sendo assim, antes de utilizar os lisímetros de pesagem para estudar o consumo hídrico de uma cultura, se torna conveniente promover alguns testes que permitam conhecer melhor o equipamento. Este procedimento aumenta o poder de decisão sobre quais dados são confiáveis e quais devem ser corrigidos ou, até mesmo, excluídos. No entanto, na maioria dos lisímetros construídos, esta fase de testes tem sido ignorada e, portanto, a confiabilidade dos dados destes equipamentos muitas vezes pode ser questionada.

4.3.1.5 Lisímetro de drenagem

Os lisímetros de drenagem são os principais representantes da classe de aparelhos lisimétricos não pesáveis estes, por sua vez, funcionam razoavelmente em períodos longos de observações (7 a 10 dias). Essa falta de precisão nos resultados obtidos desses equipamentos, em períodos curtos de avaliações, se deve principalmente a redistribuição da água no perfil do solo que acontece de forma lenta (PEREIRA et al., 1997).

Lisímetros deste tipo medem a evapotranspiração através do balanço hídrico de um determinado volume de solo isolado hidrológicamente, e é obtida considerando o fluxo de água no sentido vertical com variação da umidade (ΔU) nula.

4.3.2 Métodos indiretos

4.3.2.1 Tanque Classe A – ETo(TQ)

Os tanques de evaporação medem o efeito integrado da radiação, vento, temperatura e umidade sobre uma superfície livre de água. De um modo análogo, a planta responde as mesmas variáveis climáticas, embora diversos e importantes fatores possam introduzir mudanças significativas nessa perda de água (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Este método é bastante utilizado e recomendado pela FAO, pois o seu emprego possibilita dados que são aplicados como subsídio para irrigação, definindo a quantidade de água necessária à produtividade agrícola planejada.

A Equação (02) representa a evapotranspiração potencial pelo tanque classe A sugerida por Doorenbos & Pruitt (1977) e Doorenbos & Kassam (1994):

$$ETO_{TCA} = ECA \times Kt \quad (02)$$

em que:

ETO_{TCA} - Evapotranspiração do Tanque Classe A (mm);

ECA - Evaporação do Tanque Classe A (mm);

Kt – Coeficiente do Tanque (adimensional).

O tanque Classe “A” é um dos métodos indiretos de uso generalizado, inclusive no Brasil, em virtude do seu fácil manejo e baixo custo de implantação. No entanto, esse método requer a determinação de um coeficiente denominado coeficiente do tanque (Kt), que varia de acordo com o local e as condições climáticas (ALLEN et al., 1998).

Os métodos para cálculo dos valores de Kt normalmente utilizam informações de umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (Vv), bem como do comprimento da bordadura (B) e tipo de superfície (TS, grama ou solo nu) em torno do tanque Classe “A”. Porém, existem diversas formas de obtenção desse coeficiente, como as propostas por CUENCA (1989), SNYDER (1992) e PEREIRA et al. (1997), que podem resultar em valores diferentes, dependendo do local (SENTELHAS e FOLEGATTI, 2003; MENDONÇA et al., 2006).

A proposta de uma equação polinomial para estimar os valores de Kt por meio das informações de UR, Vv e B foi feita por CUENCA (1989), porém, segundo SNYDER (1992), a equação elaborada por esse autor é complexa e os resultados obtidos pela mesma, em alguns casos, diferem daqueles valores propostos originalmente por DOORENBOS e KASSAM (1979). Assim, SNYDER (1992) formulou uma equação linear múltipla, relacionando essas variáveis, para estimar os valores de Kt.

Uma equação de estimativa dos valores de Kt com limite superior de 0,85, relacionando os valores de ET_o com a evaporação do tanque Classe “A”, foi proposta por PEREIRA et al. (1995). O boletim da FAO-56 propõe dois métodos de

estimativa dos valores de Kt (FAO Caso A e FAO Caso B), que dependem da cobertura do solo e da localização em que o tanque se encontra instalado, bem como das condições de vento e umidade relativa do ar.

Na região de Piracicaba, SP, Sentelhas e Folegatti (2003) concluíram que os melhores métodos de determinação do Kt para estimativa da ETo foram os propostos por Pereira et al. (1995) e Cuenca (1989) e que o uso de um Kt arbitrário e constante de 0,71 na estimativa de ETo resultou na mesma precisão e exatidão das estimativas feitas com os valores de Kt determinados pelos métodos citados.

Conceição (2002) concluiu que a estimativa da ETo por meio do método do tanque Classe “A”, empregando o modelo de SNYDER para a determinação de Kt foi a que proporcionou os maiores coeficientes de determinação (r^2) e índices de concordância (d) em relação a ETo – PM, para a região noroeste do Estado de São Paulo, e que o valor médio anual de Kt, determinado a partir da relação entre ETo - PM e EV, foi de 0,74.

CHIEW et al. (1995) encontraram correlação positiva entre o método do tanque Classe “A” e PM; entretanto, somente recomendam o método do tanque quando os coeficientes (Kt) sejam bem determinados, pois os coeficientes são muito dependentes das condições climáticas locais. Os mesmos devem ser determinados comparando os dados do tanque com a ETo determinada por PM.

Em Lajes, (SC), Cardoso et al. (2003), encontraram um valor de Kt igual a 0,89 para a correlação entre Lisímetro e ECA, com variação entre 0,45 e 1,19. Braga et al. (2008) recomenda o valor de Kt igual a 0,55 para todo o ano para a região do Vale do Submédio São Francisco, BA.

4.3.2.1 Método de Hargreaves-Samani – ETo(HS)

Na ausência dos dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, a evapotranspiração pelo método de Hargreaves-Samani, em (mm dia^{-1}), pode ser estimada através da equação abaixo, citada por Pereira et al. (1997):

$$EToHg = 0,0023Ra.(Tmáx - Tmín)^{1/2}(Tm + 17,8) \quad (03)$$

em que:

EToHg - é a evapotranspiração e referência por Hargreaves-Samani (mm.dia^{-1}),

Ra - é a radiação solar no topo da atmosfera (mm.dia^{-1}),

Tm - é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);

T_{máx} – é a temperatura máxima do ar (°C)

T_{mín} – é a temperatura mínima do ar (°C).

O referido método também é recomendado pela FAO (Allen et al., 1998) quando há somente disponibilidade de dados de temperatura do ar no local de estudo.

4.3.2.2 Método Penman-Monteith-FAO – Eto(PM – FAO)

Mediante as parametrizações do boletim FAO-56 de Allen et al. (1998), a evapotranspiração de referência (Eto) é representada pela equação:

$$ET_{O_{PM}} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \cdot \gamma \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (04)$$

em que:

ET_{O_{PM}} = evapotranspiração de referência, por Penman-Monteith-FAO (mm dia⁻¹);

R_n = saldo de radiação solar à superfície vegetada (MJ m⁻² dia⁻¹);

G = densidade de fluxo de calor sensível no solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

T = temperatura média do ar (°C);

U₂ = velocidade do vento medida a 2,0 m de altura (m s⁻¹);

e_s = pressão de vapor da água na saturação (Kta);

e_a = pressão de vapor da água atual (Kta);

(e_s - e_a) = déficit de pressão de vapor d'água (Kta);

Δ = declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (Kta °C⁻¹);

γ = constante psicrométrica (Kta °C⁻¹).

4.4 Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência com lisimetria de pesagem

Com o objetivo de construir, instalar, calibrar e avaliar a sensibilidade de um lisímetro de pesagem com célula de carga, instalado em Seropédica - RJ, a fim de determinar a evapotranspiração de referência (ETo) Carvalho et al. (2007), concluiu que o equipamento permitiu uma boa obtenção de medidas de

evapotranspiração em concordância com estimativas realizadas pelo método de Penman-Monteith-FAO, na região de Seropédica - RJ.

Na tentativa de se encontrar o método que melhor represente a condição local, vários pesquisadores vêm comparando os diversos métodos existentes, assim como verificando suas vantagens e desvantagens. Santos et al. (2008), avaliando desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino, testou o desempenho de alguns métodos de estimativa da ETo, e encontrou um desempenho muito bom para o método de Penman-Monteith-FAO-FAO (PMF) e para o método de Jensen-Haise em relação ao lisímetro de pesagem.

Avaliando a evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos, Barros et al. (2009), verificaram que para a região de Seropédica, as melhores estimativas de ETo são obtidas com os métodos Penman-Monteith-FAO FAO-56, Tanque Classe A e Hargreaves-Samani principalmente para períodos de 3 e 5 dias. Os métodos de Camargo, Makking e Priestley & Taylor não estimam satisfatoriamente a ETo para observações agrupadas em pequenos períodos, por isso, são recomendados para escalas temporais maiores que cinco dias.

Utilizando lisímetro de pesagem, Souza et al. (2011) avaliaram o desempenho deste equipamento com outros métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), em diferentes condições de nebulosidade, no Município de Seropédica, (RJ), verificaram que os métodos desenvolvidos para aplicação em agrupamentos de dados maiores podem ser aplicados em menores intervalos, quando a cobertura de céu se aproxima das condições climáticas locais de origem do método.

No Estado do Ceará, Almeida et al. (2010) compararam 11 métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para a região de Fortaleza. Os métodos que apresentaram melhor desempenho para essa região, comparados com o método padrão de Penman-Monteith-FAO FAO-56, foram o Blaney&Criddle e Kimberly-Penman. O método de Blaney & Criddle, indicado pela FAO para estimativas mensais, necessita de menor quantidade de dados climatológicos em relação ao método padrão, Porém, apresentou péssimo desempenho para a região de Fortaleza. Os métodos Tanque Classe "A" e Makkink (1957) foram os que mais subestimaram a ETo em Fortaleza-CE em 28%,16% e 18,37%, respectivamente. Essa subestimativa quanto a Makkink (1957) também foi encontrada por Turco et al.

(2008), o que foi explicado pelo fato de que esse método foi desenvolvido em regiões frias, ocasionando subestimativa quando usado em regiões quentes.

Sousa et al. (2010) determinaram a evapotranspiração de referência através de vários métodos de estimativa para o Estado do Sergipe. Os autores concluíram que para os perímetros irrigados do estado, os valores obtidos pelos métodos do Tanque Classe “A”, Hargreaves, Priestly & Taylor, Jensen & Haise e do Linacre se distanciam, nessa ordem, daqueles obtidos com o método padrão de Penman-Monteith-FAO. Os métodos de obtenção da evapotranspiração que incorporam o saldo de radiação solar são os que apresentam os valores mais próximos daqueles obtidos pelo método de Penman-Monteith-FAO.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Características da área experimental

O trabalho foi conduzido em Recife, no campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco (8°01'05" de latitude Sul, 34°56'48" de longitude oeste, com altitude de 6,4m), situado na região litorânea do estado (ALBUQUERQUE FILHO, 2006).

A área experimental possui dimensões totais de 255,6 m² coberta com grama batatais (*Paspalumnotatum*), onde se encontra uma estação agrometeorológica, composta por uma estação agroclimática automática (Campbell Scientific modelo CR1000/CFM100/OS100, com sensores de medição de chuva, de temperatura e umidade relativa do ar, de velocidade e direção do vento, sensores de radiação solar e um microprocessador eletrônico tipo datalogger, alimentado por uma bateria de 12V que é carregada com um painel solar), um tanque Classe A, um lisímetro de drenagem e um lisímetro de pesagem hidráulica com dois sistemas de leituras: Um sistema automatizado, em que as leituras são processadas e armazenadas no processador e o outro sistema de leitura manual em uma régua graduada no manômetro com pistão de mercúrio (Figura 1).

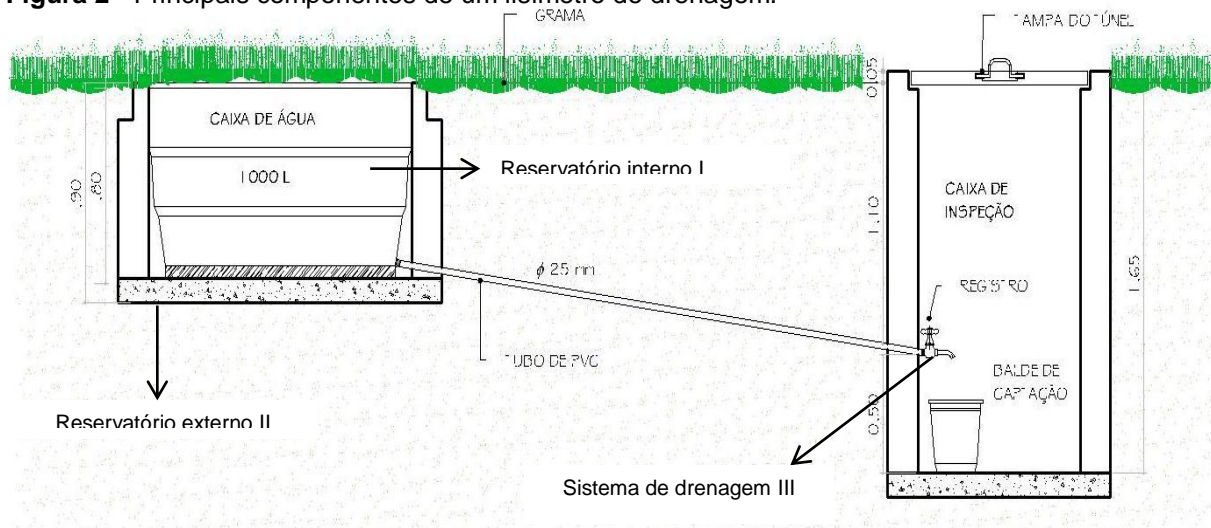
Figura 1 - Detalhes da área experimental



5.1.1 Lisímetro de drenagem

O lisímetro de drenagem é do tipo drenagem livre e é composto dos seguintes componentes: (I) Reservatório externo; (II) Reservatório interno e (III) Sistema de drenagem do reservatório interno (Figura 2).

Figura 2 - Principais componentes de um lisímetro de drenagem.



Fonte: Lima, (2012)

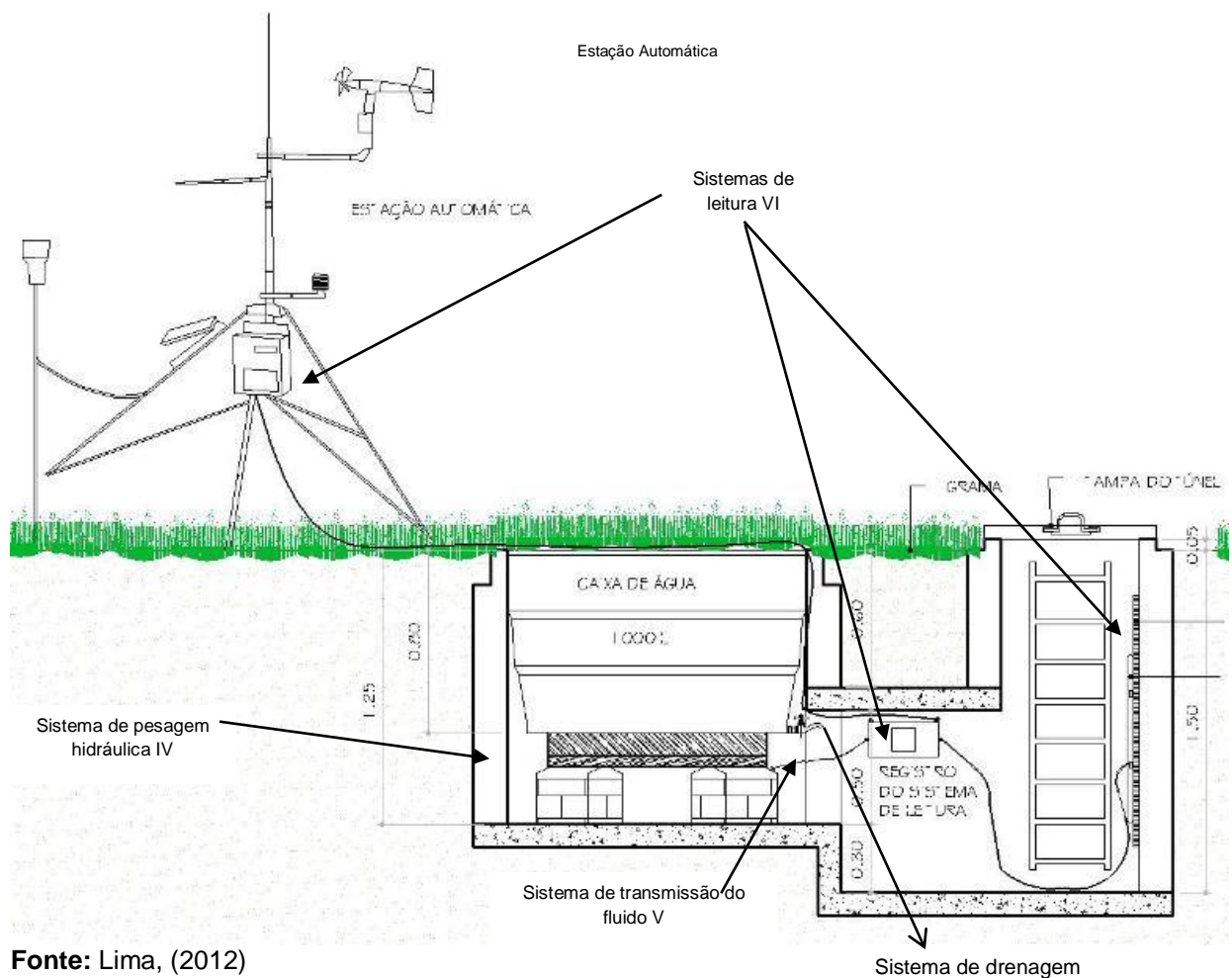
O reservatório externo do lisímetro tem como finalidade a contenção do solo em redor do lisímetro, protegendo assim o reservatório interno contendo o solo. Já o reservatório interno é constituído de uma caixa cônica em fibra de vidro (caixa d'água), com diâmetro superior de 1,30 m; diâmetro inferior de 1,17 m e altura de

0,80 m; com capacidade volumétrica de aproximadamente 1m^3 e área superficial de $1,32\text{m}^2$. O sistema de drenagem dos lisímetros é do tipo gravitacional, para permitir que chuvas ou irrigação que excederem a capacidade de retenção de água do solo, seja drenada.

5.1.2 Lisímetro de pesagem

O lisímetro de pesagem hidráulica é composto dos mesmos componentes do lisímetro de drenagem (Figura 2), com acréscimo dos seguintes: (IV) Sistema de pesagem hidráulica; (V) Sistema transmissor de pressão e (VI) Sistema de leitura (Figura 3).

Figura 3 - Principais componentes do lisímetro de pesagem hidráulica.



Fonte: Lima, (2012)

O reservatório externo do lisímetro de pesagem foi construído com paredes em alvenaria. O reservatório interno do lisímetro de pesagem possui

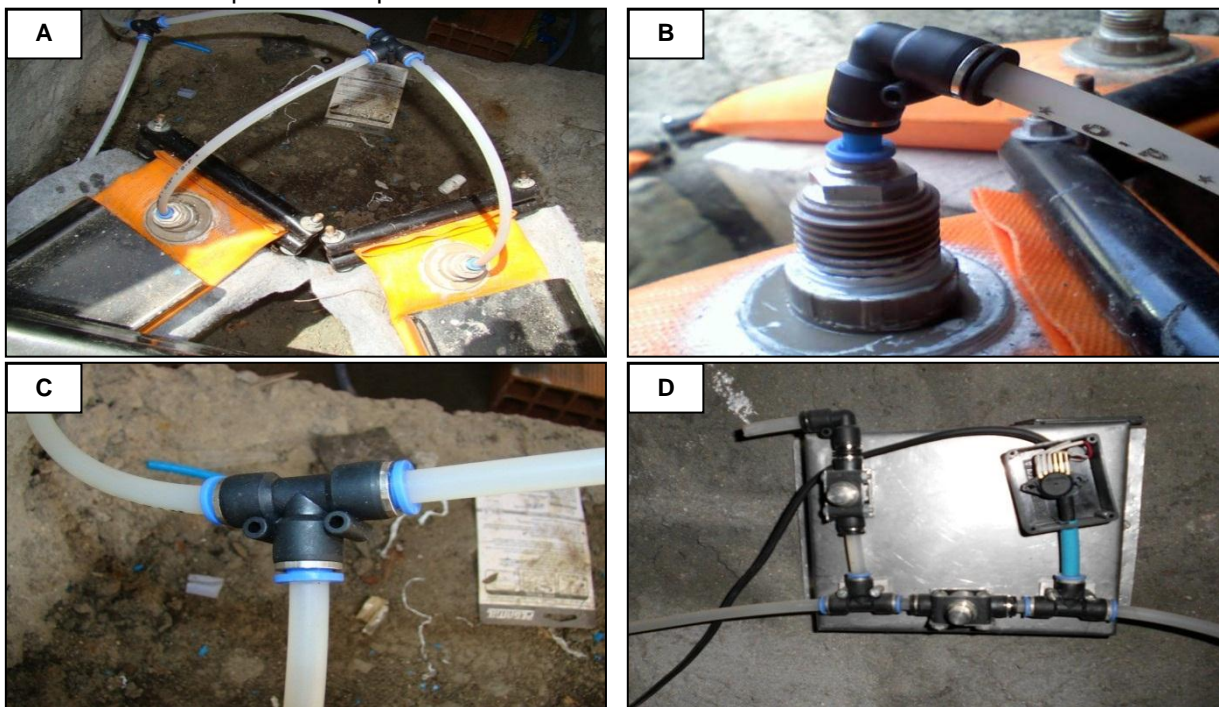
dimensões e material semelhantes ao reservatório do lisímetro de drenagem, assim como o sistema de drenagem.

O sistema de pesagem é composto por células de carga hidráulica e é composto por três mangueiras tipo auto extingüível, fabricada com butil-propileno reforçado com tecido de nylon, fechadas nas extremidades por presilhas, duas por mangueira.

Na superfície superior das mangueiras foram acomodados: três perfis metálicos em forma de “U” com “alma” de 0,15 m, abas de 0,05 m, espessura de 3/16” para área de contato e comprimento de 0,65 m, sendo um perfil para cada mangueira, com o objetivo de distribuir o peso do sistema sobre a superfície dos colchões hidráulicos.

O sistema de transmissão de fluido foi inserido em uma única lateral de cada mangueira. O sistema de controle geral é constituído de um painel em alumínio chumbado na parede lateral do túnel de acesso. No painel estão inseridos: um sangradouro, um registro geral de pressão, que controla todo o fluxo e tem como principal função o total fechamento do sistema; um tê que situa-se logo após o registro geral e deriva o fluxo para os dois sistemas de leitura. Na saída vertical superior do tê de derivação foi inserido o transdutor de pressão hidrostática (MPX5100GP – Motorola) e na saída horizontal lateral foi conectado outro registro que controla o fluxo de passagem para o manômetro com coluna de mercúrio (Figura 4).

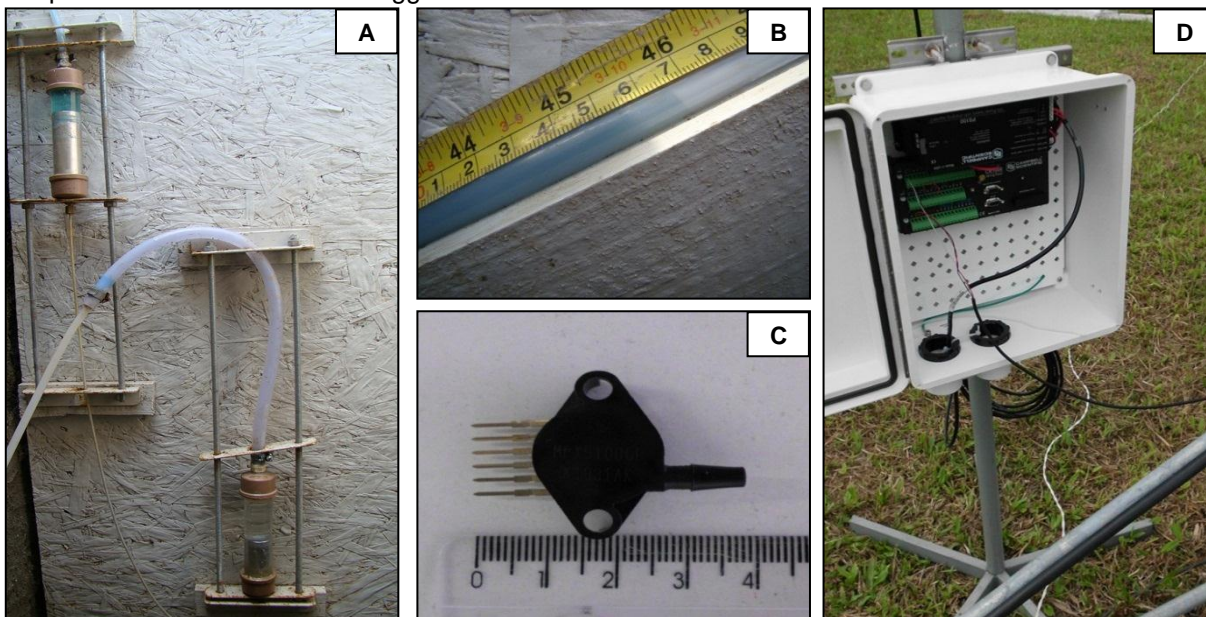
Figura 4 - Mangueiras em nylon para transmissão do fluido entre os travesseiros hidráulicos (A), Joelho de saída tipo engate rápido (B), tê tipo engate rápido (C) e sistema de controle geral de fluxo com transdutor de pressão acoplado.



Fonte: Lima, (2012)

O sistema de leitura do lisímetro de pesagem hidráulica foi composto por dois sistemas independentes: (I) manômetro com pistão de mercúrio e (II) transdutor de pressão hidrostática (Figura 5). O manômetro de pistão de mercúrio consiste em dois recipientes cilíndricos de vidro medindo cada um 150 mm de comprimento, 25 mm de diâmetro interno. Já o transdutor de pressão hidrostática foi o modelo MPX5100GP da Motorola (sensibilidade de 0,01 mV e capacidade de leituras de até 10 m.c.a.), foi acoplado ao duto final de comunicação das células de carga hidráulicas para registro automático das leituras lisimétricas. As medições da resposta foram armazenadas por um microprocessador eletrônico tipo datalogger, modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA), já situado na estação meteorológica, em que este armazena os sinais do transdutor de pressão hidrostática em mV.

Figura 5 - Sistemas de leituras do lisímetro de pesagem hidráulica: Manômetro com pistão de mercúrio (A), régua inclinada 30° (B), detalhe do transdutor de pressão hidrostática (C) e transdutor de pressão conectado ao datalogger.



Fonte: Lima, (2012)

Pelo fato do projeto inicial desenvolvido por Lima (2012) ter apresentado algumas falhas com o passar do tempo, como alagamento do reservatório externo e concentração da massa do reservatório interno sobre alguns pontos do sistema de pesagem, proporcionando rupturas na caixa interna, resolveu-se realizar algumas modificações, como a construção de um sistema de drenagem para o reservatório externo, uma vez que, a topografia era favorável, bem como, adicionou-se uma chapa metálica sobre o sistema de pesagem para que houvesse uma melhor distribuição da massa lisimétrica, pela maior superfície de contato (Figura 6).

Figura 6 – Modificações no projeto inicial do lisímetro de pesagem.



5.1.3 Caracterização física do solo dos lisímetros e Teor de umidade no solo

Para caracterização do solo, foram coletadas amostras a 20, 40 e 60 cm de profundidade, logo após foi homogeneizado, seco ao ar e peneirado em malha de 4,0 mm. O solo foi classificado como Espodossolo Ferrihumilúvico Órtico Dúrico, arênico. As características físicas do solo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise física do solo dos lisímetros até a profundidade de 60 cm.

Camada de solo (cm)	Granulometria (%)			Densidade (g cm ⁻³)	
	Areia	Argila	Silte	Global	Partícula
0 – 20	93,73	4,26	2,01	1,65	2,53
20 – 40	95,03	3,46	1,5	1,63	2,53
40 – 60	94,6	4,39	1	1,68	2,57

A capacidade de campo (Cc) foi determinada saturando-se o solo até que a drenagem profunda iniciasse no dreno da caixa lisimétrica, logo após cobriu-se a superfície do solo com uma lona plástica, com o intuito de evitar a evaporação superficial, forçando a água exclusivamente a drenar, e quando a drenagem tornou-se desprezível, o que ocorreu em três dias, foi obtida a umidade do solo na

capacidade de campo, metodologia sugerida por (REICHARDT, K. e TIMM, L C. 2012).

5.1.4 Coleta de dados agrometeorológicos

O armazenamento dos dados dos elementos agrometeorológicos incluindo a do lisímetro de pesagem hidráulica automatizado era realizada pelo microprocessador eletrônico modelo CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, EUA), programado para armazenar informações médias dos sensores em intervalos diários, horários e a cada 15 minutos.

Todos os dados armazenados na CR1000, bem como, os dados registrados em caderneta como os dados do lisímetro de drenagem, lisímetro de pesagem hidráulica com sistema de leitura manométrica e tanque Classe A foram coletados diariamente às 8:00 horas da manhã.

5.2 Variáveis analisadas

5.2.1 Avaliação do desempenho do lisímetro de pesagem hidráulica

A avaliação do desempenho do lisímetro de pesagem hidráulica foi determinada por quatro processos de calibração que ocorreram a cada três meses (março, junho, setembro e dezembro de 2013) durante a condução do ensaio, conforme metodologia apresentada por Campeche (2002), Oliveira (2007) e Lima (2012) e através da determinação dos erros de medidas, que são utilizados para qualificar os dados em análise. Quatro tipos de erros de medidas são apontados na literatura: exatidão, precisão, sensibilidade e resolução (CAMPECHE, 2002). No entanto, para este tipo de lisímetro, deve-se também levar em consideração a estabilidade do equipamento.

O processo de calibração visou estabelecer a correspondência entre o estímulo e a resposta de um instrumento de medição, resultando em um índice de relação.

O coeficiente de calibração (k), que é a diferença da leitura em mm na régua do manômetro ou em mV no registrador de pressão eletrônico dividido pela massa de carregamento ou descarregamento no tanque, expresso por milímetros de lâmina de água.

$$k = [\text{Leitura final} - \text{Leitura inicial (mV)}] / \text{peso adicionado ou retirado (kg)} \quad (05)$$

Para o cálculo do coeficiente de calibração (k), foi determinado o fator de conversão de milímetros e milivolt de leitura para milímetros de ETo, conforme abaixo:

- Área superficial do tanque de grama = 1,327 m²;

- Lâmina d'água = Volume de água (L) / Área superficial (m²)

Assim, para densidade da água de 1 g cm⁻³, tem-se que:

1 mm de ETo = 1,327(L) / 1,327 m², ou seja, é a razão entre a diferença da leitura (mm) no manômetro e a massa de carregamento ou descarregamento no tanque, expresso por milímetros de lâmina de água.

O processo de calibração foi dividido em duas etapas. A primeira etapa ocorreu no centro do lisímetro, em que foram adicionados e retirados 50 sacos de brita nº 1, hermeticamente fechados, representando 1,0 mm de lâmina evapotranspirada, totalizando um acréscimo de 50 mm de equivalente de água e a cada adição e retirada dos pesos esperava-se dois minutos para estabilização do sistema de leitura. Na segunda etapa ocorreu o mesmo procedimento, só que a superfície do lisímetro foi dividida em quatro quadrantes, onde foram adicionados e retirados 25 pesos padrão, totalizando um acréscimo de 25 mm de lâmina. Esta última etapa foi realizada com o intuito de verificar a estabilidade do equipamento com a determinação do erro médio posicional em relação ao centro e assim obtiveram-se coeficientes de calibração em cada lado e no centro.

Desta forma foram obtidos 50 pares de pontos no setor central e 25 pares de pontos em cada quadrante para confecção da curva de calibração através da regressão linear simples e correlação, sendo avaliada a linearidade e acurácia.

Figura 7 - Detalhes da calibração no setor central e nos quadrantes pela adição e retirada de pesos padrão.



Conforme indicam Faria et al. (2006), Oliveira (2007), Flumignan (2011), Schmidt et al. (2013), Lima et al. (2013), a calibração foi realizada em campo, e para evitar as mudanças de massa do sistema devido à evaporação da água do solo, o lisímetro foi coberto com lona plástica. Inicialmente, foi registrada a média de milivoltagem do sistema de leitura sem os pesos padrões.

Para determinação dos erros de medida foi necessário inicialmente a calibração do equipamento. Obtidos os 50 pares de pontos no setor central e 25 pares de pontos em cada quadrante, confeccionaram-se as curvas de calibração através da regressão linear simples e correlação, sendo avaliada posteriormente a linearidade, acurácia, sensibilidade, exatidão e estabilidade.

Assim, a exatidão dos equipamentos foi determinada por meio do erro padrão, que foi a dispersão por regressão linear simples calculada para cada uma das quatro calibrações por meio de planilha eletrônicas (EXCEL 2010) dos valores de massa mensurados pelos lisímetros da primeira etapa (central) com o sistema de

leitura manométrico e com o transdutor de pressão em relação aos valores das massas padrões (sacos de brita), conforme metodologia apresentada por Campeche (2002); Carvalho (2007), Campeche et al. (2011) e Nascimento (2011).

A precisão foi determinada por meio de variações de massa de água que foram comprovadas pelos valores de erro médio absoluto.

A resolução é inerente ao conjunto célula de carga hidráulica-datalogger e/ ou célula de carga hidráulica-manômetro, sendo a menor escala da divisão ou o último dígito que pode ser lido pelo equipamento de medição. Assim, a resolução que é a aptidão de um instrumento de medição de distinguir valores muito próximos da grandeza a medir, no caso do referido lisímetro foi determinada pelo menor valor de ETo registrado através da diferença de leituras diárias do manômetro e no transdutor de pressão durante o processo de calibração, ou seja, é a razão entre o menor valor de leitura obtido durante as diferentes calibrações pelos seus respectivos fatores de conversões, conforme Oliveira (2007) e Lima (2012).

A sensibilidade foi obtida pela observação da menor variação do sinal elétrico emitido, e/ou menor variação observada na régua do manômetro, quando detectada uma mudança de massa do equipamento, determinada a partir dos dados plotados numa planilha eletrônica.

A estabilidade do lisímetro foi determinada através da análise do erro médio posicional que é uma medida obtida através da comparação da média dos coeficientes de calibração dos quadrantes e do coeficiente de calibração obtido no centro do equipamento.

5.2.2 Comparação da ETo na região litorânea entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com sistemas de leituras manométrico e por intermédio do transdutor de pressão e métodos indiretos em escala horária, diária e quinquenal.

5.2.2.1 Cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) pelo lisímetro de pesagem hidráulica

A determinação da evapotranspiração por meio do lisímetro de pesagem hidráulica foi realizada através da operacionalização horária e diária do lisímetro com o registro das variações de pressões sofridas nas células de cargas hidráulica resultantes da mudança de peso devido às entradas de água (chuva ou irrigação) que foram medidas no computador acoplado ao processador CR1000 e régua graduada no manômetro com pistão de mercúrio e saídas (drenagem profunda e evapotranspiração) medidas também no computador acoplado ao processador, proveta e balde graduado. As leituras periódicas foram com o solo próximo da capacidade de campo e após determinar o coeficiente de calibração e fator de conversão.

Durante o monitoramento da ETo pelo lisímetro, ocorreram dias com eventos chuvosos, com precipitações superiores a cinco milímetros, que impossibilitaram os registros de leituras lisimétricas, não sendo portanto, considerados. A operação do lisímetro em campo foi fundamentada nos dias em que não houve influência de tais eventos chuvosos, ou ainda, nos dias que houve a coleta de volume drenado por gravidade (Vd).

As leituras para os registros diários ocorreram às 8 horas do dia atual, em que, se verificava a leitura inicial na régua, ou seja, a altura da coluna de água do sistema de leitura (Li) do manômetro com pistão de mercúrio e no computador acoplado ao processador, posteriormente, o volume drenado por gravidade (Vd), coletado em um balde graduado, com capacidade de 20 L e proveta de 1000 mL, quando necessário. Em seguida, calculava-se o volume adicionado (Va) para restabelecimento da umidade próxima à capacidade de campo, tendo como referência a leitura no sistema de leitura (Li) do manômetro com pistão de mercúrio conforme Equação 06:

$$V_a = (L_f - L_i) \cdot k \quad (06)$$

em que:

V_a = volume adicionado (litros);

L_f = leitura final do manômetro no dia anterior, após irrigação (mm);

L_i = leitura inicial do manômetro no dia atual (mm);

k = coeficiente de calibração (litros de água/mm de leitura).

O volume adicionado (V_a) foi executado com o balde graduado, de forma lenta e uniforme em toda a área superficial. Esperou-se pelo menos 2 (dois) minutos após a irrigação, para estabilização do manômetro de leitura e verificação da leitura final (L_f).

Observou-se que, em alguns dias, não foram necessários a aplicação do volume adicionado (V_a) por irrigação, fato este devido à ocorrência de precipitação que causou retenção de água no tanque maior que a ET_o . Desta forma a leitura final (L_f) do dia atual assumiu o mesmo valor da leitura inicial do mesmo dia.

A evapotranspiração de referência diária (ET_o) determinada pelo lisímetro de pesagem hidráulica resultou da seguinte equação:

$$ET_o(LIS) = \frac{(L_f - L_i)}{f} + P - L_d \quad (07)$$

em que:

$ET_o(LIS)$ = evapotranspiração de referência pelo lisímetro (mm d^{-1});

L_f = leitura final do manômetro no dia anterior, após irrigação (mm);

L_i = leitura inicial do manômetro no dia atual (mm);

f = fator de conversão de mm de leitura para mm de ET_o ;

$P(\text{mm})$ = precipitação no período (mm d^{-1});

L_d = lâmina drenada (mm d^{-1});

O fator de conversão (f) é a variação do manômetro de leitura causada para cada milímetro evapotranspirado. Esta relação é definida como o quociente entre o fator de conversão de milímetros de leitura para milímetros de ET_o , (1 mm de ET_o = 1,327 litros de água ou 1.327 g de água ou 1,327 kg de água) e o coeficiente de calibração (k).

A lâmina drenada (L_d) em mm d^{-1} foi determinada conforme a equação:

$$L_d = \frac{V_d}{1,327} \quad (08)$$

em que:

V_d = volume drenado (litros).

As leituras para os registros horários ocorreram das 06 as 17 horas dos dias 17, 18 e 19 de novembro de 2013, em que, também se verificava a leitura inicial na régua, ou seja, a altura da coluna de água do sistema de leitura (L_i) do manômetro com pistão de mercúrio e no computador acoplado ao processador, posteriormente, o volume drenado por gravidade (V_d), coletado em um balde graduado, com capacidade de 20 L e proveta de 1000 mL, quando necessário.

A evapotranspiração de referência horária (ET_o) determinada pelo lisímetro de pesagem hidráulica resultou da seguinte equação:

$$ET_o(LIS) = \frac{(L_f - L_i)}{f} + P - L_d \quad (09)$$

em que:

$ET_o(LIS)$ = evapotranspiração de referência pelo lisímetro (mm h^{-1});

L_f = leitura final do manômetro no dia anterior, após irrigação (mm);

L_i = leitura inicial do manômetro no dia atual (mm);

f = fator de conversão de mm de leitura para mm de ET_o ;

$P(\text{mm})$ = precipitação no período (mm h^{-1});

L_d = lâmina drenada (mm h^{-1});

5.2.2.1 Métodos indiretos para estimativa da ET_o

Para a estimativa da ET_o foram utilizados 3 (três) métodos indiretos, todos calculados em planilhas eletrônicas (Excel), dentre eles:

1) Método Tanque classe A - $ET_o(TQ)$ (02)

2) Método de Hargreaves-Samani – $ET_o(HS)$ (1985) (03)

3) Método Penman-Monteith-FAO – FAO (1998) (04)

5.2.2.2 Índices estatísticos para desempenho dos métodos de determinação da evapotranspiração

Para a análise comparativa do lisímetro de pesagem hidráulico com os demais métodos empírico-teóricos calculou-se as médias das variáveis meteorológicas em escala horária, diária, e quinzenal, utilizando índices estatísticos de comparação em que se considerou o lisímetro de pesagem hidráulica com o sistema de leitura manométrico como padrão pelo fato das leituras serem manuais, sem riscos de falhas eletrônicas. Camargo e Sentelhas (1997) sugerem como índices estatísticos os coeficientes de correlação de Pearson (r) para precisão, o índice de Willmott (d) para exatidão e o de Camargo (c) para confiança ou desempenho.

O índice de Willmott et al. (1985) que representa a concordância ou exatidão (d), é calculado pela expressão:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left[\left| (P_i - \bar{O}) \right| + \left| (O_i - \bar{O}) \right| \right]^2} \right] \quad (10)$$

O índice de correlação de Pearson, que representa a precisão (r), pode ser calculado por esta equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \left[(O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (11)$$

O índice c, proposto por Camargo & Sentelha (1997) para expressar a confiança ou desempenho, é obtido por:

$$c = r \times d \quad (12)$$

Nessas equações, P_i é o valor estimado, \bar{Y} é a média dos valores estimados, O_i é o valor observado e \bar{O} é a média dos valores observados. O valor observado é aquele tomado como referência para os demais. O índice d varia de 0 a 1, em que o valor 1 significa uma perfeita exatidão entre os dados estimados e o

adotado como padrão, enquanto que o valor zero significa que não há concordância entre os valores analisados.

Camargo & Sentelhas (1997) propõem uma interpretação do desempenho, a partir do índice *c*, em uma tabela que julga de péssimo a ótimo o desempenho da ETo. (Tabela 2).

Tabela 2 - Critérios de interpretação do coeficiente *c* de Camargo

Valores de "c"	Desempenho	Valor de "c"	Desempenho
> 0,85	Ótimo	0,51 a 0,60	Sofrível
0,76 a 0,85	Muito Bom	0,41 a 0,50	Mau
0,66 a 0,75	Bom	≤ 0,40	Péssimo
0,61 a 0,65	Mediano		

Fonte: (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Além dos índices estatísticos acima apresentados, valeu-se de outros índices tais como: o erro absoluto médio (EAM) e o erro padrão da estimativa (EPE), que são apresentados a seguir:

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (13)$$

$$EPE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{(n-1)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

5.2.2.3 Comparação da evapotranspiração de referência medidas com lisímetro de pesagem com valores estimados a partir de dados do tanque Classe A utilizando-se diferentes métodos de determinação do Kt em escala diária

Para comparação da evapotranspiração de referência medidas com lisímetro de pesagem com valores estimados a partir de dados do tanque Classe A utilizando-se diferentes métodos de determinação do Kt, utilizou-se dados diários (período de março de 2013 a fevereiro de 2014), totalizando 215 dias (59% dos dados possíveis).

Excluíram-se os dados referentes aos dias de chuvas intensas e/ou dias que eram necessários manutenções no Lisímetro de pesagem e Tanque Classe A.

A ETo diária considerada padrão de referência foi determinada pelo método do Lisímetro de pesagem com sistema de leitura manométrico, de acordo com a Equação 07.

Para estimativa da ETo pelo método do TCA por diferentes métodos utilizou-se a Equação 15:

$$ETO_{TCA} = ECA \times Kt \quad (15)$$

em que:

ETO_{TCA} - Evapotranspiração do Tanque Classe A (mm);

ECA - Evaporação do Tanque Classe A (mm);

Kt – Coeficiente do Tanque (adimensional).

Os valores de Kt diários foram determinados pelas seguintes metodologias:

Allen (1998) apresentada na equação (17)

$$Kp = 0,108 - 0,0286V + 0,0422\ln(B) + 0,1434\ln(UR) - 0,000631[\ln(B)]^2\ln(UR) \quad (16)$$

em que:

V - é a velocidade do vento a 2,0 m do solo, em $m s^{-1}$;

B - é dado pela distância da bordadura que circunda o tanque, sendo de 10,0 m de grama, no presente trabalho;

UR - é a umidade relativa média.

O método de Cuenca (1989) apresentada na Equação (17)

$$K_p = 0,475 - 2,4 \times 10^{-4} V + 5,16 \times 10^{-3} UR + 1,18 \times 10^{-3} B - 1,6 \times 10^{-5} UR^2 - 1,01 \times 10^{-6} B^2 - 8,0 \times 10^{-9} UR^2 V - 1,0 \times 10^{-8} UR^2 B \quad (17)$$

em que:

V - é a velocidade do vento a 2,0 m do solo, em $m s^{-1}$;

B - é dado pela distância da bordadura que circunda o tanque, sendo de 10,0 m de grama, no presente trabalho;

UR - é a umidade relativa média.

O método de Snyder (1992) apresentada na Equação (18)

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,000376V + 0,0045UR \quad (18)$$

em que:

Ln - é o logaritmo natural de B;

B - é dado pela distância da bordadura que circunda o tanque, sendo de 10,0 m de grama, no presente trabalho;

V - é a velocidade do vento a 2,0 m do solo, em $Km dia^{-1}$;

UR - é a umidade relativa média em percentagem.

O método de Pereira et al. (1995) apresentada na Equação (19)

$$K_p = K_{p\max} \frac{(s + \gamma)}{[s + \gamma(1 + 0,34V)]} \quad (19)$$

em que:

γ - é o coeficiente psicrométrico igual a $0,0725 Kta/^{\circ}C$, para uma pressão atmosférica média de $90,66 Kta$ e constante psicrométrica de $80,10^{-5}/^{\circ}C$;

V - é a velocidade do vento a 2,0 m do solo, em $m s^{-1}$;

S - é a declividade da curva de pressão de vapor ($Kta/^{\circ}C$), calculada pela expressão:

$$s = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (20)$$

em que:

T - é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$);

e_s - é a pressão de saturação (Kta) calculada pela expressão:

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\left(\frac{7,5T}{T+237,3}\right)} \quad (21)$$

O método da correlação entre $EToLis_{Mano}$ e ECA apresentada na Equação (22)

$$EToLis_{mano} = f(ECA) \quad (22)$$

Para avaliação da performance dos métodos, procedeu-se uma análise de regressão linear, considerando-se o modelo linear $y=ax+b$, na qual a variável dependente foi o método do lisímetro de pesagem com sistema de leitura manométrico, e a variável independente o método do tanque Classe A estimado com diferentes metodologias de Kt. Utilizaram-se, ainda, o índice de concordância de Willmott, o erro médio absoluto (EMA), o erro máximo (EMAX) e a eficiência do método (EF), através das equações 23, 24, 25 e 26, respectivamente.

$$D = 1 - \frac{\sum[(O - E)^2]}{\sum[|E - X| + |O - X|]^2} \quad (23)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum |O - E| \quad (24)$$

$$EMAX = \text{MAX}(|O - E|)^n \quad (25)$$

$$EF = \frac{\sum(O - X)^2 + \sum(O - E)^2}{\sum(O - X)^2} \quad (26)$$

5.2.3 Avaliação comparativa dos aspectos construtivos, econômicos e de manejo dos lisímetros de pesagem hidráulica e de drenagem.

Ao longo da pesquisa foi realizada a comparação entre os lisímetro de pesagem hidráulica com os dois sistemas de leitura e o lisímetro de drenagem, analisando aspectos construtivos, econômicos e aspectos de manejo. Para os aspectos construtivos e econômicos avaliou-se o custo de construção (alvenaria) dos lisímetros, peças e acessórios incluindo aparelho de aquisição de dados (datalogger), mercúrio para o registro das leituras no manômetro, e custos casuais. Em relação aos aspectos de manejo avaliou-se a forma pela qual é medida a variação no armazenamento da água em seu interior e as dificuldades operacionais. Para que se pudesse alcançar uma boa análise de desempenho desses equipamentos foram realizadas avaliações dos índices estatísticos, dentre eles o coeficiente de correlação de Pearson r para precisão, o índice de Willmott d para exatidão, e o de Camargo c para confiança ou desempenho, calculando as médias das variáveis meteorológicas para escala pentada, em que considerou o lisímetro de pesagem hidráulico com sistema de leitura manométrico como padrão.

Para medir ETo pelo lisímetro de drenagem, foi utilizado a expressão do balanço hídrico em escala quinzenal de um determinado volume de solo isolado hidrológicamente dada pela equação abaixo em que, desconsidera a variação no armazenamento (ΔU) no período avaliado:

$$ET = P + I - D \quad (27)$$

Em que:

P = precipitação (mm);

I = irrigação (mm);

D = drenagem (mm).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Coeficiente de calibração, estabilidade e precisão do lisímetro.

Os resultados das quatro calibrações realizadas em campo ao longo do ano demonstram que a correlação entre a massa padrão e as leituras no manômetro de mercúrio em milímetro (mm) e do transdutor de pressão em milivoltagem (mV) apresentaram respostas lineares ($R^2 > 0,99$) no carregamento e descarregamento em cada um dos 4 (quatro) setores e no centro do lisímetro, conforme Figuras 8 e 9, respectivamente.

A linearidade dos dados verificada nas quatro calibrações ao longo do ano confirma que a área de contato de todo sistema de pesagem (travesseiros hidráulicos, perfis metálicos e chapa de ferro) permaneceu constante à adição e retirada das massas.

Segundo Gommola (2000), considerando-se que a célula de carga é fabricada para variar linearmente o seu sinal com a massa a qual é submetida, assume-se que a calibração realizada para uma determinada faixa seja válida para toda a faixa de trabalho da célula de carga.

Figura 8 - Curvas de calibração entre as leituras observadas no manômetro e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) no centro do lisímetro.

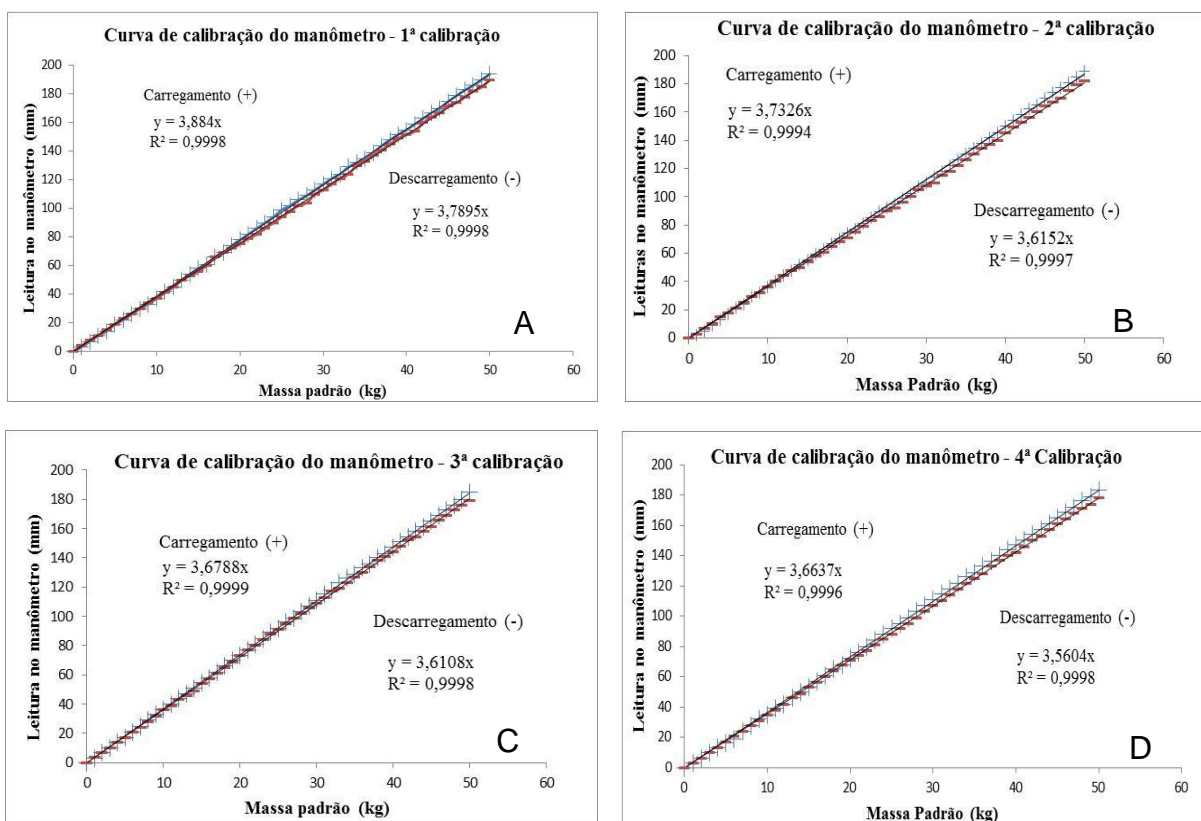
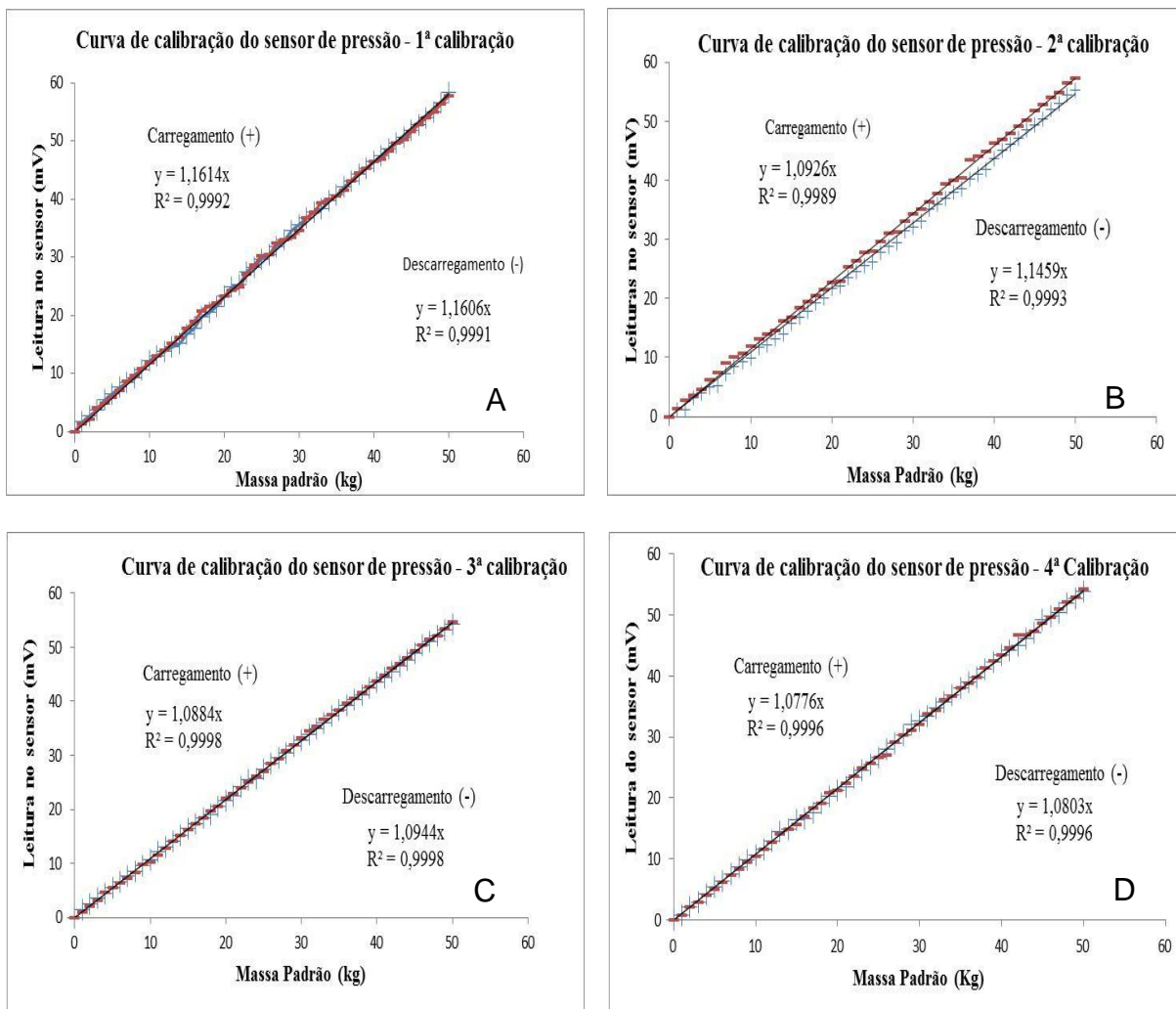
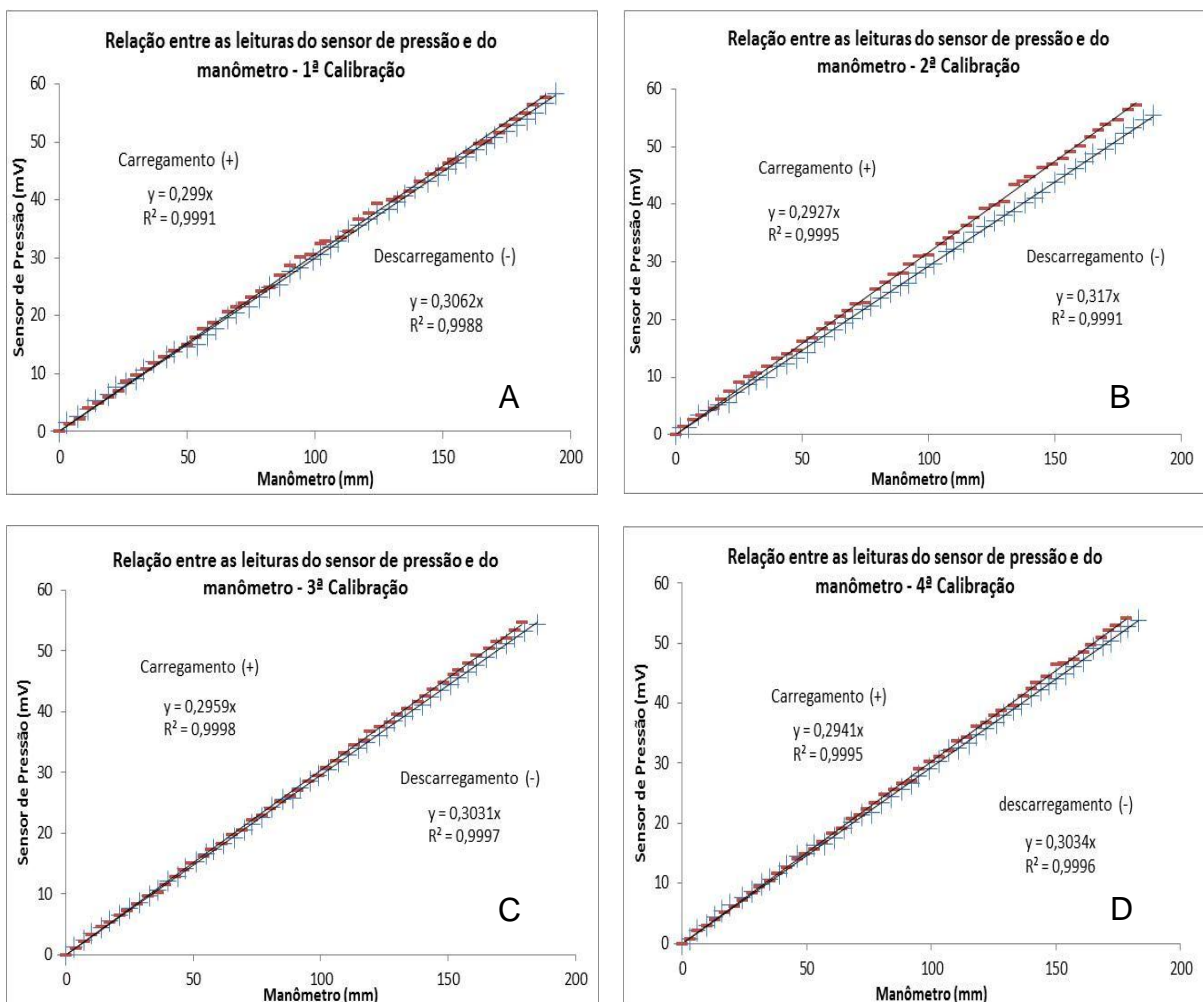


Figura 9 - Curvas de calibração entre as leituras observadas no transdutor de pressão e massas padrão adicionadas (+) e retiradas (-) no centro do lisímetro.



Os resultados dos ensaios das diferentes calibrações realizadas durante o início dos meses de março, junho, setembro e dezembro de 2013 permitiram obter a relação entre os valores obtidos pelo manômetro e transdutor de pressão, para o setor central do lisímetro de pesagem (Figura 10). Assim, verifica-se que a regressão linear descreve adequadamente a relação entre a variação dos dados dos dois sistemas de leitura. Observa-se também que o elevado coeficiente de determinação ($R^2 > 0,99$) demonstra que as medidas se ajustam a uma reta linear das variáveis estudadas. Silva (2005) e Lima (2012) encontraram coeficientes de determinação similares ao presente estudo e alta correlação, quando compararam as leituras visuais no manômetro e respostas obtidas com o transdutor de pressão.

Figura 10 - Relação entre as leituras do transdutor de pressão e do manômetro do mercúrio para carregamento e descarregamento das massas padrão, para o setor central do lisímetro.



A Tabela 3 apresenta o resumo dos coeficientes de calibração do centro e dos quadrantes do lisímetro obtidos com leituras visuais no manômetro. Esses valores correspondem à média dos coeficientes angulares das regressões lineares obtidos pelas diferentes calibrações ao longo do ano pelo processo de carregamento e descarregamento do equipamento. A média dos coeficientes de calibração nos quadrantes variou de 3,64 a 3,85 mm kg⁻¹ ou 0,27 a 0,25 kg mm⁻¹ ao longo do ano enquanto que a média dos coeficientes de calibração no centro variou de 3,61 a 3,84 mm kg⁻¹ ou 0,27 a 0,26 kg mm⁻¹, ou seja, a variação de 1mm de leitura no manômetro correspondeu à adição ou retirada de 0,26 litros de água para primeira calibração e de 0,27 litros de água para demais calibrações.

Tabela 3 - Resumo dos coeficientes de calibração (k) e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica ajustados para os dois ciclos de variação de massa lida no manômetro.

Quadrante do Lisímetro	Coeficiente de calibração (k) do manômetro (mm kg ⁻¹)			
	1 ^a Calibração	2 ^a Calibração	3 ^a Calibração	4 ^a Calibração
1	3,60	4,22	4,16	4,13
2	4,31	3,61	3,52	3,50
3	3,39	3,35	3,29	3,17
4	4,11	3,80	3,80	3,76
Média dos quadrantes	3,85	3,74	3,69	3,64
Centro do lisímetro	3,84	3,67	3,64	3,61
Erro médio posicional (%)	0,26	1,92	1,33	0,76

A Tabela 4 apresenta o resumo dos coeficientes de calibração do centro e dos quadrantes do lisímetro obtidos com o transdutor de pressão. Esses valores correspondem à média dos coeficientes angulares das regressões lineares obtidas pelas diferentes calibrações ao longo do ano pelo processo de carregamento e descarregamento do equipamento. A média dos coeficientes de calibração nos quadrantes variou de 1,11 a 1,20 mV kg⁻¹ ou 0,90 a 0,83 kg mV⁻¹ ao longo do ano enquanto que a média dos coeficientes de calibração no centro variou de 1,08 a 1,16 mm kg⁻¹ ou 0,92 a 0,86 kg mV⁻¹, ou seja, a variação de 1mm de leitura no transdutor de pressão correspondeu a adição ou retirada de 0,86; 0,89; 0,91 e 0,92 litros de água para primeira, segunda terceira e quarta calibrações respectivamente.

Tabela 4 - Resumo dos coeficientes de calibração (k) e erro médio posicional do lisímetro de pesagem hidráulica ajustados para os dois ciclos de variação de massa lida no transdutor de pressão.

Quadrante do Lisímetro	Coeficiente de calibração (k) do transdutor de pressão (mV kg ⁻¹)			
	1 ^a Calibração	2 ^a Calibração	3 ^a Calibração	4 ^a Calibração
1 ^o	1,16	1,30	1,29	1,24
2 ^o	1,31	1,06	1,10	1,07
3 ^o	1,07	1,02	1,02	0,97
4 ^o	1,24	1,23	1,20	1,17
Média dos quadrantes	1,20	1,15	1,15	1,11
Centro do lisímetro	1,16	1,12	1,09	1,08
Erro médio posicional (%)	3,01	3,11	5,70	3,13

Verifica-se nas Tabelas 3 e 4 que a estabilidade do lisímetro foi determinada através da análise do erro médio posicional que é uma medida obtida através da comparação da média dos coeficientes de calibração dos quadrantes e do coeficiente de calibração obtido no centro do equipamento. Foi verificada uma

variação de 0,26 a 1,33% do erro médio posicional para o manômetro e de 3,01 a 5,70% para o transdutor de pressão ao longo do ano. Esses valores são compatíveis com os valores obtidos por os lisímetros construídos por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004), Oliveira (2007) e Lima (2012) com erro médio posicional de 4%; 3,52%; 2,11%; 3,93%, 2,31 % e 1,73% respectivamente.

Possivelmente o menor erro médio posicional obtido, principalmente quando se compara com os valores obtidos pelo Oliveira (2007) e Lima (2012), justifica-se pelo fato de se utilizar um sistema de pesagem com mangueiras rígidas com engate rápido, bem como uma chapa de ferro sob a caixa interna do lisímetro o que possibilitou uma maior superfície de contato e melhor distribuição da massa, proporcionando assim uma maior estabilidade.

Santos et al. (2008), Oliveira et al. (2008), e Lima et al, (2013), encontraram valores de erro posicional inferiores a 6%. O referido limite percentual de erro posicional exclui a possibilidade de tendência à inclinação do tanque e, desta forma, atesta também a impossibilidade de não uniformidade do fluido nas câmaras hidráulicas e, conseqüentemente erros de leituras lisimétricas.

A resolução é a aptidão de um instrumento de medição de distinguir valores muito próximos da grandeza a medir. No caso do referido lisímetro, a resolução corresponde ao menor valor de ETo registrado através da diferença de leituras diárias do manômetro e no transdutor de pressão.

Tabela 5 - Resumo dos menores valores de leitura, fator de conversão e resolução observadas no manômetro.

	Calibrações do manômetro ao longo do ano			
	1 ^a Calibração	2 ^a Calibração	3 ^a Calibração	4 ^a Calibração
Menor valor de leitura na régua inclinada (mm)	2	2	2	2
Menor valor de leitura convertido (mm)	1	1	1	1
Fator de conversão (mm)	5,10	4,87	4,83	4,79
Resolução do manômetro (mm)	0,196	0,205	0,207	0,209

O fator de conversão de mm ou mV de leitura para mm de ETo é utilizado para o cálculo da ETo. A sua determinação se dá pela razão da área efetiva do lisímetro (1,327m²) pelo coeficiente de calibração (Kg mm⁻¹ ou mV mm⁻¹). As Tabelas 5 e 6 apresentam o resumo dos menores valores de leitura, fator de

conversão e resolução observados no manômetro e no transdutor de pressão. Observa-se que o transdutor de pressão apresentou menores resoluções (0,12 a 0,19 mm). No entanto, com uma variação de 36%, ao longo do ano. Já o manômetro, apesar de apresentar maiores valores de resolução (0,19 a 0,20 mm) apresentou apenas uma variação de 5% ao longo do ano. A resolução manométrica e do transdutor de pressão do lisímetro deste ensaio é compatível com as precisões encontradas por Freitas (1994), Costa (1999), Silva (2000), Santos (2004), Silva (2005), Oliveira (2007) e Lima (2012) respectivamente de 0,21; 0,29; 0,13; 0,10; 0,24; 0,15 e 0,13 mm.

Tabela 6 - Resumo dos menores valores de leitura, fator de conversão de resolução observada no Transdutor de pressão.

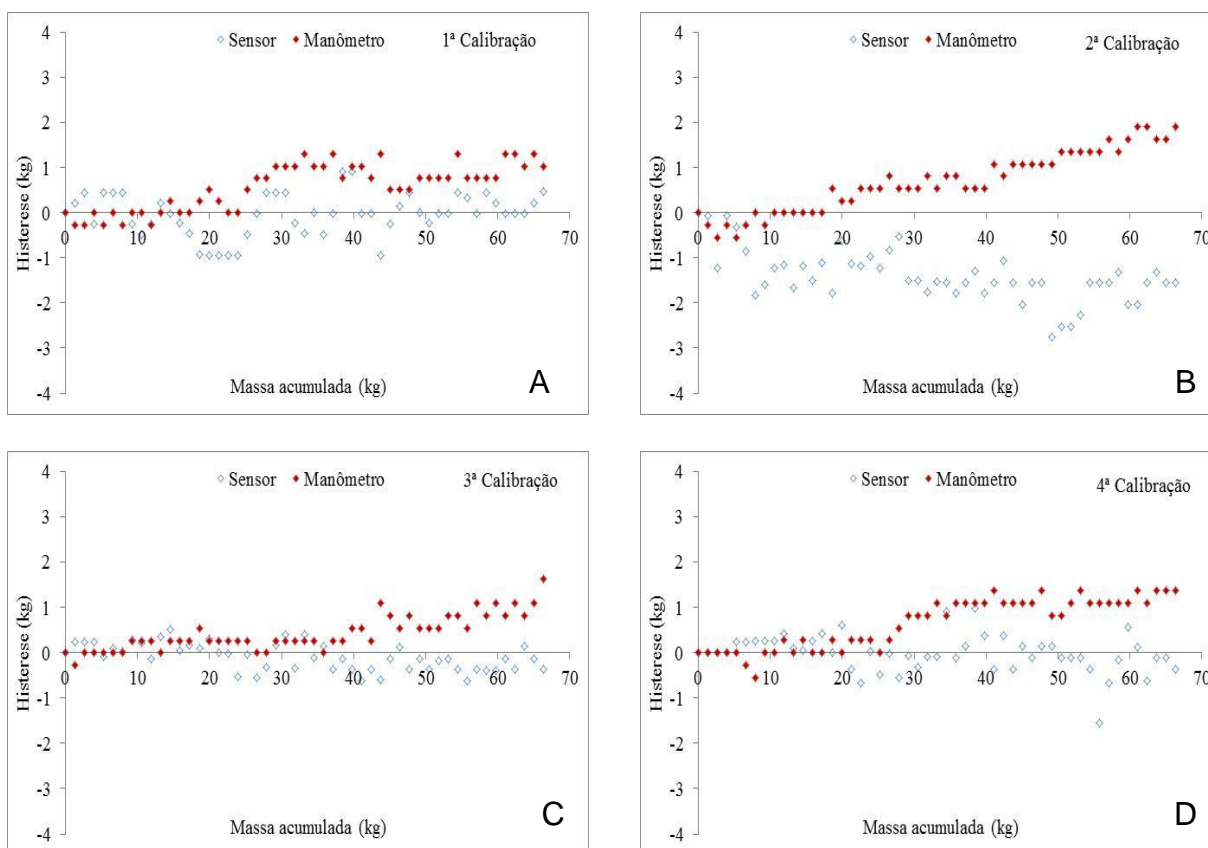
Variável	Calibrações do Transdutor de pressão ao longo do ano			
	1 ^a Calibração	2 ^a Calibração	3 ^a Calibração	4 ^a Calibração
Menor valor de leitura (mV)	0,26	0,19	0,27	0,28
Fator de conversão (mm)	1,54	1,49	1,45	1,43
Resolução do manômetro (mm)	0,169	0,128	0,187	0,195

Observa-se na Figura 11, que tanto o manômetro como o transdutor de pressão apresentaram desvios entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento, e que esses desvios entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento indicam a existência de histerese. Para as leituras realizadas no manômetro de mercúrio, as massas-padrão determinadas no manômetro de mercúrio, as massas-padrão determinadas no descarregamento foram em média 0,599, 0,707, 0,444, 0,681 kg, o que corresponde a 0,451, 0,533, 0,335 e 0,513 mm para a primeira, segunda, terceira e quarta calibração, respectivamente. Os resultados das leituras manométricas foram inferiores aos encontrados por Lima et al. (2013). Acredita-se que justificativa pela menor histerese seja explicada pela adição de uma chapa de ferro sob a caixa interna do lisímetro, o que pode ter proporcionado uma maior superfície de contato, resultando em uma maior estabilidade do equipamento e conseqüentemente em uma menor histerese.

Analisando a mesma Figura 11, observa-se que as leituras obtidas pelo transdutor de pressão hidrostática, também apresentaram baixa histerese, sendo as massas de descarregamento, em média 0,030; 1,429; 0,091 e 0,013, maiores que aquelas determinadas no carregamento. Os resultados desta pesquisa obtidas pelo transdutor de pressão diferem dos dados obtidos por Flumignam (2011) e Lima et al.

(2013) que observaram valores maiores dos desvios no sentido de carregamento para a célula de carga do lisímetro de pesagem.

Figura 11 - Histerese apresentada pela variação de massa de carregamento e descarregamento no manômetro e transdutor de pressão durante as quatro calibrações realizadas no centro do lisímetro durante um ano de avaliação.



Os valores de histerese observados tanto no manômetro, quanto no transdutor de pressão, próximos a origem, podem estar associados ao intervalo de leitura entre carregamento e descarregamento das massas padrão, que foi de dois minutos (CAMPECHE, 2002). Este intervalo é suficiente para que os dois sistemas de leitura possam estabilizar e assim diminuir os erros de histerese.

A Tabela 7 apresenta os valores de acurácia do lisímetro de pesagem determinados por diferentes sistemas de leituras. A exatidão dos equipamentos foi determinada por meio do erro padrão, que foi a dispersão por regressão linear simples calculada para cada uma das quatro calibrações dos valores de massa mensurados pelos lisímetros da primeira etapa (central) com o sistema de leitura manométrico e com o transdutor de pressão em relação aos valores das massas padrões (sacos de brita), conforme metodologia apresentada por Campeche (2002); Carvalho (2007), Campeche et al. (2011) e Nascimento (2011).

Tabela 7 - Valores de Acurácia do lisímetro de pesagem determinados por diferentes sistemas de leituras.

Sistema de Leitura	Valores da acurácia do Lisímetro (mm)			
	1ª Calibração	2ª Calibração	3ª Calibração	4ª Calibração
Manométrico	0,25	0,32	0,20	0,29
Transdutor de Pressão	0,53	0,53	0,25	0,37

Os valores da acurácia do lisímetro de pesagem hidráulica com sistema de leitura manométrica variou de 0,20 a 0,32 mm, tendo um valor médio de 0,26 mm, o que equivale a uma massa de 0,07 kg, enquanto que os valores da acurácia do lisímetro de pesagem hidráulica com sistema de leitura com o transdutor de pressão variou de 0,25 a 0,53 mm, tendo um valor médio de 0,42 mm, o que equivale a uma massa de 0,38 kg. Os valores de acurácia no lisímetro de pesagem independente de sistema de leitura foram inferiores aos encontrados por Miranda et al. (1999) e Nascimento et al. (2011) que variaram de 0,4 a 1 mm e superiores aos valores encontrados por Campeche (2011) de 0,08 mm e Campeche (2002), que variaram de 0,02 a 0,1 mm, utilizando a mesma metodologia empregada no presente estudo.

6.2 Comparação da ETo entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com diferentes sistemas de leituras e o método de Penman-Monteith-FAO em escala horária.

Para demonstrar a capacidade dos lisímetros descritos neste trabalho em monitorar componentes do balanço hídrico em diferentes escalas, avaliou-se a comparação horária da ETo acumulada do lisímetro de pesagem hidráulica, com diferentes sistemas de leituras e o método de Penman-Monteith-FAO, durante os dias 17, 18 e 19 do mês de novembro de 2013, escolhidos aleatoriamente e pelo tempo favorável, conforme metodologia utilizada por Faria et al. (2006).

Neste período, a evapotranspiração acumulada pelo método de Penman-Monteith-FAO usando dados medidos na estação agrometeorológica próxima ao lisímetro foi de 2,64, 3,51 e 3,31 mm h⁻¹ para os dias 17, 18 e 19, respectivamente. Houve registro de chuva um dia antes do ensaio e nas primeiras horas da manhã do dia 18/11. Por esse fato, não se teve necessidade de irrigação para o primeiro e terceiro dia. Assim, a variação de massa ocorreu somente em virtude das perdas por evapotranspiração para o primeiro dia e perdas por evapotranspiração e drenagem

para o terceiro dia, que somaram $3,49 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,87 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente para o lisímetro com sistema de leitura com o transdutor de pressão e $2,48 \text{ mm dia}^{-1}$ e $3,52 \text{ mm dia}^{-1}$ para o lisímetro com sistema de leitura manométrico. Para o segundo dia de avaliação, a determinação da ETo horária ocorreu contabilizando-se os dados de entrada (precipitação) e de saída através do sistema de drenagem e evapotranspiração por meio variação de massa que ocorreu durante o dia, somando $4,72 \text{ mm dia}^{-1}$ para o lisímetro com sistema de leitura com o transdutor de pressão e $3,31 \text{ mm dia}^{-1}$ para o lisímetro com sistema de leitura manométrico.

Verifica-se na Tabela 08, as médias diárias da velocidade do vento a 2 m de altura, temperatura do ar, da umidade relativa do ar, saldo de radiação e precipitação para o período analisado. Considerando a variação entre os dias, não foram observadas mudanças substanciais na velocidade do vento, umidade relativa ou na radiação durante o dia. Notou-se que as maiores variações ocorreram durante o período diurno, justificando a taxa de variação da ETo ao longo das horas do dia.

Tabela 8 - Resumo médio diário de velocidade do vento, temperatura média, umidade relativa, saldo de radiação e precipitação pluviométrica em Recife-PE, no período de 17 a 19 de novembro de 2013.

Dias	V (m s^{-1})	T ($^{\circ}\text{C}$)	UR (%)	Saldo de Radiação (W m^{-2})	Precipitação diária (mm)
17/nov/13	0,99	27,8	68	127,4	0,0
18/nov/13	0,78	27,5	73	105,2	5,3
19/nov/13	1,00	28,1	73	149,8	0,0

Após análise dos dados de ETo na região litorânea entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com diferentes sistemas de leituras e o método de Penman-Monteith, observa-se uma diferença entre os valores de ETo diário e horário calculada por método de Penman-Monteith, onde os dados de evapotranspiração calculados com dados de base diária apresentaram uma média de $3,36 \text{ mm dia}^{-1}$, valor 7% superior à média de $3,15 \text{ mm dia}^{-1}$ encontrada para os valores de evapotranspiração calculada a partir dos dados de evapotranspiração horária. Essa diferença não observada para o lisímetro de pesagem independente do sistema de leitura.

Estes resultados corroboram com Grazhdani, Ahmeti e Bitri (2010) que afirmam que as parametrizações de ASCE-PM e FAO56-PM, tendem a calcular uma menor ETo quando realizado o cálculo horário e feita a somatória diária do que

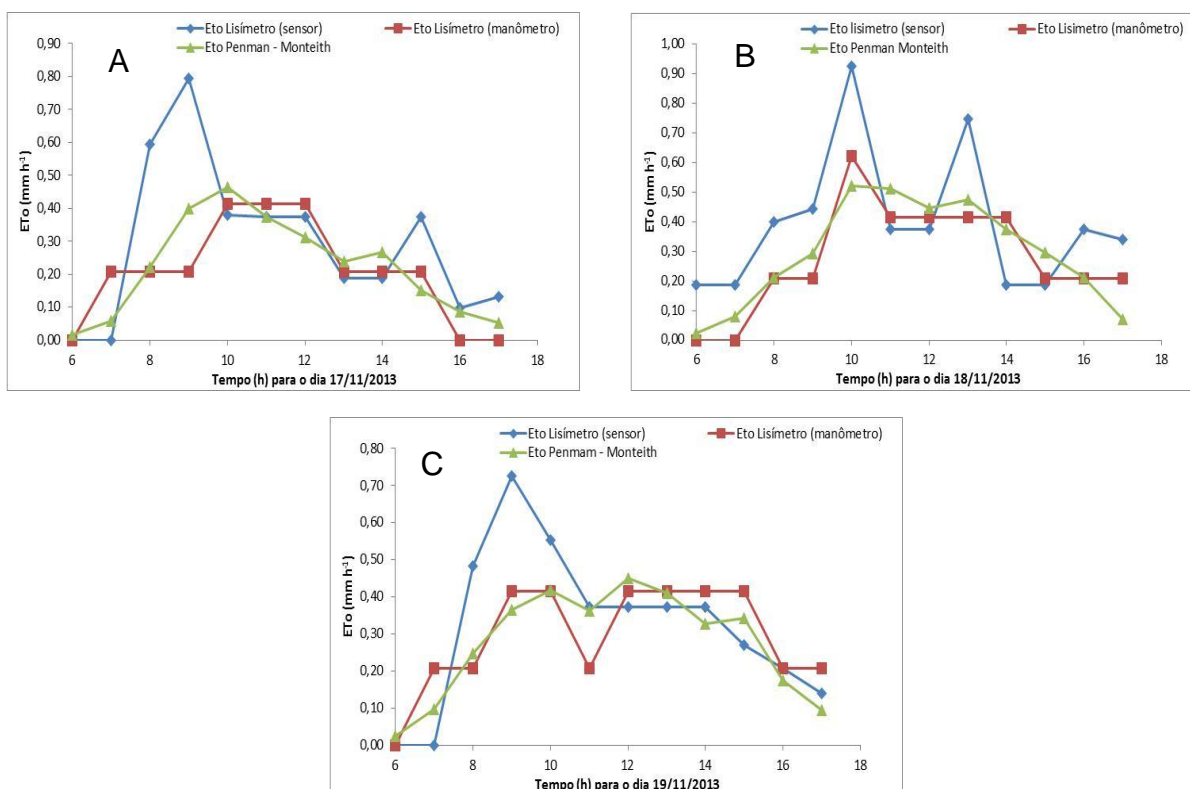
quando aplicado a intervalos de tempo diário. Os autores ainda afirmam que essa diferença é em torno de 4%, valor semelhante ao encontrado no presente trabalho.

Bezerra et al. (2007) determinaram a evapotranspiração de referência com intervalos horários e diários para localidade de Pedro Avelino no Rio Grande do Norte utilizando-se dados para o período chuvoso e seco, e verificaram que as estimativas de ETo com as médias da soma horária foram abaixo das médias diárias, com diferença de 16,11% e 11,97% para o período seco e chuvoso, respectivamente.

Feitoza et al. (2011) calcularam a evapotranspiração de referência em intervalos de dados horários e diário, e concluíram que a evapotranspiração de referência calculada com dados diários apresentou valores em média 6% acima dos valores da evapotranspiração calculada com os dados horários para uma estação no noroeste paulista.

As variações da evapotranspiração (Figura 12) apresentaram valores mais elevados durante o período entre 09 e 14 horas para todos os dias, em decorrência da maior radiação solar e temperatura neste horário, conforme registro na estação agrometeorologia instalada próximo ao lisímetro.

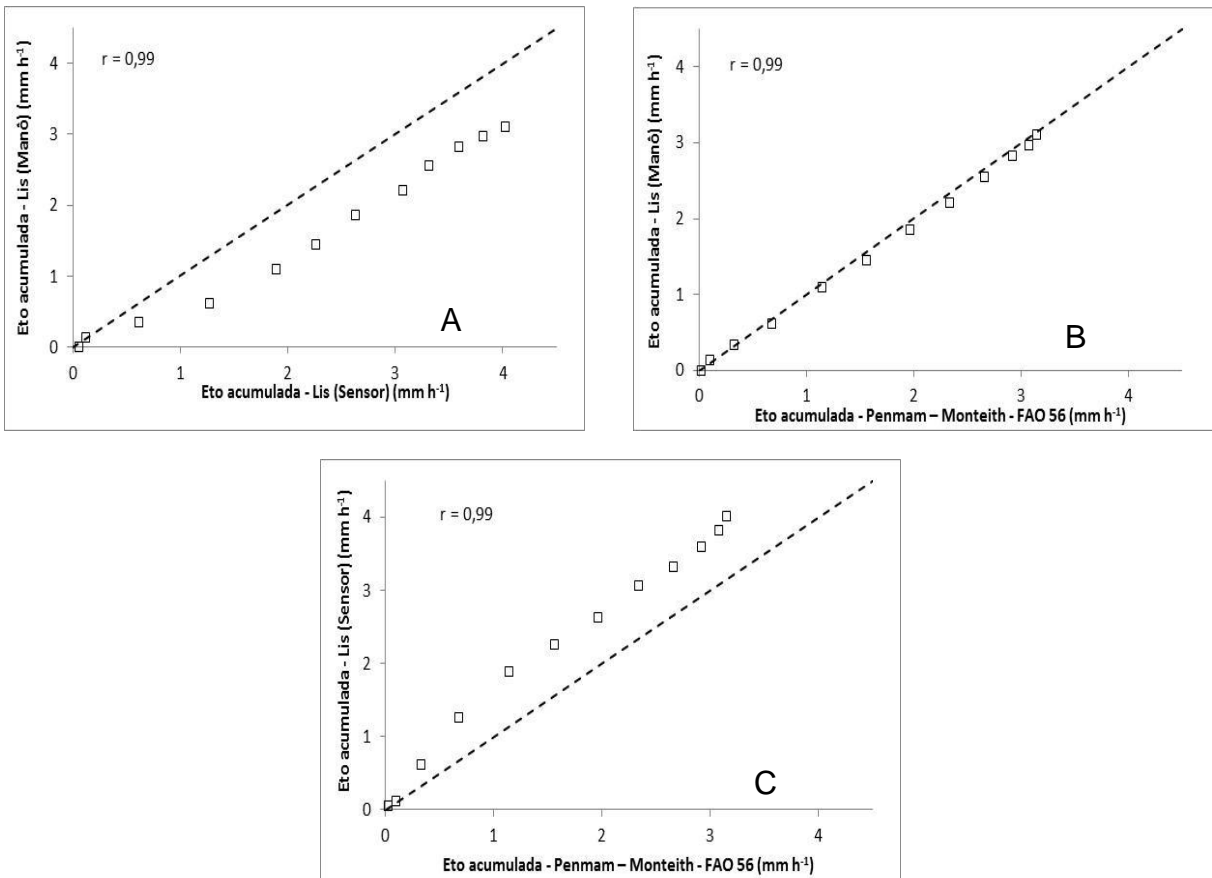
Figura 12 – Taxa de variação horária da evapotranspiração de referências medida por lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e estimada por Penman-Monteith-FAO, durante o período de 17 a 19 de novembro de 2013.



Na Figura 13 observa-se a comparação do ETo horária medida pelo lisímetro de pesagem com os sistemas leituras manométrico e transdutor de pressão, bem como a ETo horária medida pelo lisímetro de pesagem através de diferentes de leituras com ETo estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO. Na comparação entre os diferentes métodos diretos (Figura 13A), nota-se uma subestimativa média de 20% do Eto medida pelo transdutor de pressão, em relação ao manômetro. Provavelmente, essa diferença pode ser explicada por erros relacionados ao sistema de pesagem que podem estar associados ao transdutor de pressão, aos cabos, ou ao sistema de coleta.

Verifica-se também na Figura 13, que o método indireto subestimou a ETo do lisímetro de pesagem com sistema de leitura manométrico em 3%. No entanto, quando se analisa correlação do lisímetro com sistema de leitura realizado pelo transdutor de pressão há uma superestimação em 19% pelo método de Penman-Monteith-FAO.

Figura 13 – Análise de correlação da ETo horária medida pelo lisímetro de pesagem com diferentes sistemas de leituras e pelo método de Penman-Monteith-FAO.



Flumignan (2011) comenta que, mesmo depois de calibrados, os lisímetros de pesagem com células de carga podem ter suas medições influenciadas por fatores externos, dentre os quais se destacam a temperatura do ar e o vento. Devido ao grande aporte de componentes eletrônicos envolvidos, a variação da temperatura do ar pode introduzir significativa incerteza sobre as medições obtidas, o aumento da temperatura e a ocorrência de ventos podem promover vibrações nos lisímetros que também introduzem incertezas nas medições (VAUGHAN & AYARS, 2009).

Na Tabela 09, observa-se que os coeficientes de correlação (r) ficaram em torno de 0,99, indicando uma boa precisão, ou seja, um baixo desvio dos valores médios horários da evapotranspiração de referência (ETo).

Além dos resultados de r , constata-se pela Tabela 09 que o índice de concordância (d) também apresentou resultados satisfatórios para todos os métodos, com d superior a 0,81 para todas as comparações.

Por terem apresentados valores de (d) mais próximo de 1 quando comparados à medida com o lisímetro de pesagem independente do sistema de leitura ao método de Penman-monteith, os resultados indicam que as medidas com o lisímetro de pesagem hidráulica permitiram estimar os valores de ETo com boa exatidão para o período analisado (horário). Ou seja, com um baixo desvio entre os valores estimados e observados, sendo justificado e observado na Figura 13.

Em relação aos erros de estimativa (EMA e EPE), constata-se pela Tabela 09, que os melhores resultados foram obtidos da correlação do Lisímetro com o sistema de leitura manométrico x método de Penman-Monteith, seguido da correlação do Lisímetro de pesagem com diferentes com os diferentes sistemas de leitura. Os valores dos erros padrão da estimativa foram de 0,04 e 0,16 mm hora^{-1} respectivamente, e para o erro médio absoluto de 0,07 e 0,63 mm hora^{-1} respectivamente.

Os valores dos erros de estimativa do lisímetro de pesagem com o sistema de leitura pelo transdutor de pressão x método de Penman-Monteith foi de 0,17 mm hora^{-1} , para um erro médios absoluto de 0,56 mm hora^{-1} para os erros médios absolutos. Verifica-se ao analisar os dados horários, que houve uma maior dispersão da ETo (Figura 13 e Tabela 09), comprovado pelo maior erro médio absoluto e erro padrão da estimativa.

Tabela 9 – Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de desempenho (c), erro padrão das estimativa (EPE) e erro médio absoluto (EMA) para as correlações entre valores horários de ETo do lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e pelo método de Penman-Monteith-FAO.

Métodos escala horária	r	d	C	EPE	EMA
Lis. (Sensor) x Lis. Mano	0,99	0,81	0,80	0,16	0,63
Penman - Monteith x Lis. Mano	0,99	0,99	0,99	0,04	0,07
Penman - Monteith Lis. (Sensor)	0,99	0,87	0,86	0,17	0,56

6.3 Comparação da ETo na região litorânea entre o lisímetro de pesagem hidráulica, com diferentes sistemas de leituras, e métodos indiretos em escala diária e quinquenal.

Na Figura 14 estão apresentados os gráficos e os modelos resultantes da correlação linear considerando a comparação do ETo diária medida pelo lisímetro de pesagem com diferentes sistemas de leitura, com ETo estimada pelos métodos de Penman-Monteith-FAO e Hargreaves e Samani, totalizando 215 dias (59% dos dados possíveis). As medições e estimativas foram submetidas à análise de correlação com o método padrão, obtendo-se o índice de correlação (r), o índice de concordância (d), índice de confiança (c), e o erro padrão da estimativa (EPE).

Ao longo do período estudado, a comparação dos valores de ETo diárias e quinquenais medidas pelo lisímetro de pesagem com sistema de leitura pelo transdutor de pressão e os valores de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith-FAO (Figuras 14 d e 15 d) se ajustaram melhor do que as comparações obtidas pelo lisímetro de pesagem com sistema de leitura manométrico, tido como método padrão e Penman-Monteith-FAO (Figuras 14 b e 15 b). Silva et al. (2003), comparando diferentes métodos de estimativa da ETo com a determinada em lisímetro de pesagem no município de Petrolina-PE, encontraram um desempenho muito bom para o método de Penman-Monteith-FAO. Valores semelhantes também foram encontrados por Barros et al. (2009) avaliando a ETo na região de Seropédica-RJ, através de lisímetro de pesagem e modelos matemáticos, dentre eles Penman-Monteith-FAO_FAO.

Quando se compara os dados de evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro de pesagem com os encontrados pelo método de Penman-Monteith-FAO_FAO e Hargreaves-Samani dependendo da região, segundo Tagliaferre et al. (2010), espera-se que os resultados apresentem boa correlação, isso porque método de Penman-Monteith-FAO foi recomendado pela FAO (SMITH, 1991) como

o mais adequado para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) de uma cultura em escala diária.

Para Bryla, Trout e Ayars (2010), a lisimetria de pesagem é reconhecidamente a melhor técnica para se determinar a evapotranspiração das culturas, sendo adotada como metodologia padrão para servir de referência na avaliação de outros métodos e para calibrar e validar modelos de estimativa da evapotranspiração de diferentes culturas, no entanto, para este último verificou-se que, tal comportamento não ocorreu.

Pode-se observar nas Figuras 14c e 14e, além da Tabela 10 que o método de Hargreaves-Samani apresentou correlações não satisfatórias ($r = 0,49$ e $r = 0,55$), quando comparado com o lisímetro de pesagem independente do sistema de pesagem, apresentando um desempenho classificado como Péssimo, segundo Camargo e Sentelha (1997) para os sistemas de leitura de pesagem manométricos e para o transdutor de pressão respectivamente.

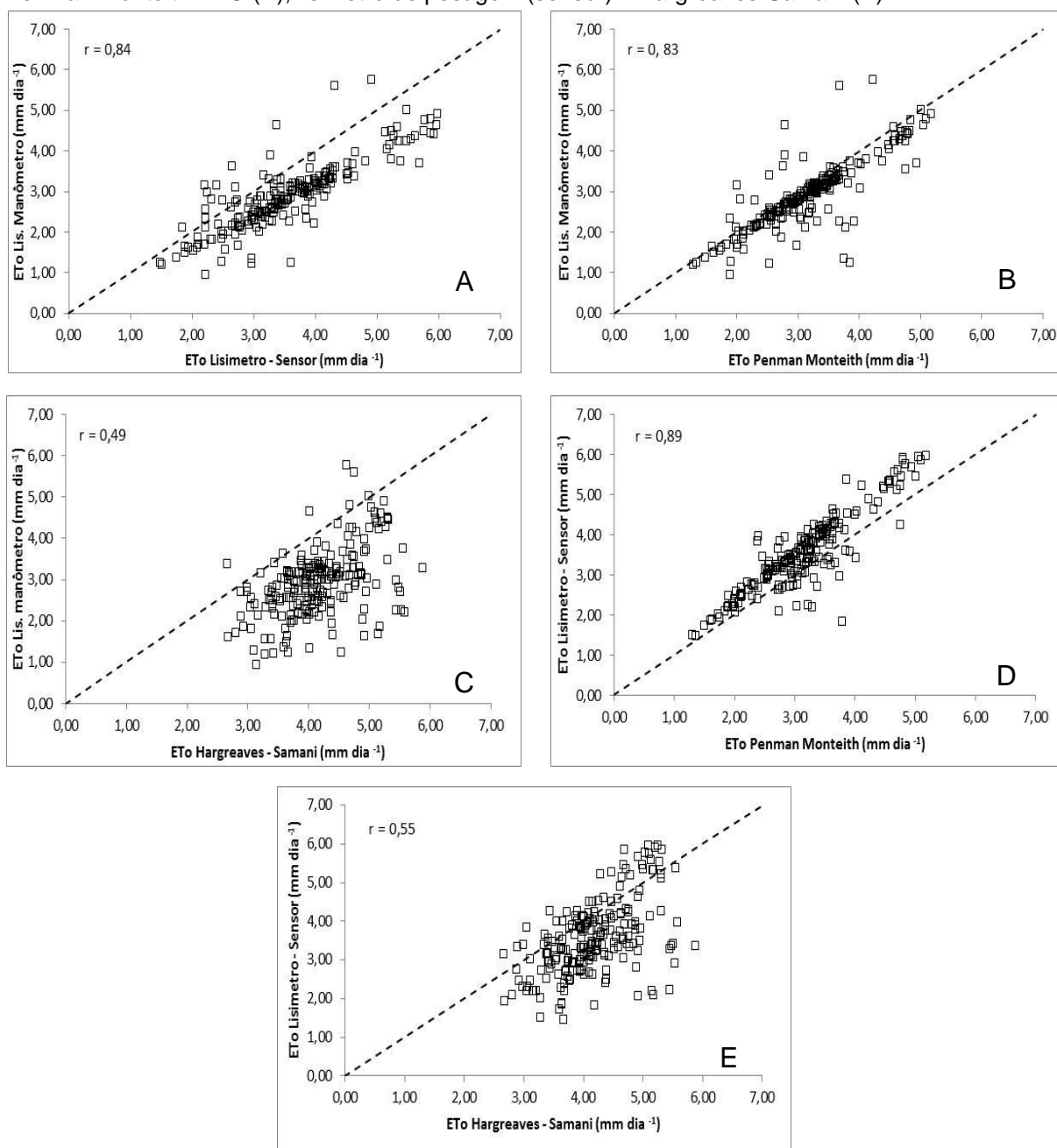
O método de Hargreaves-Samani, apesar de limitado, é muito utilizado para estimativa da ET_o no Brasil, provavelmente, por ser bastante simples, necessitando apenas de dados de temperatura máxima e mínima, o que possibilita que aqueles produtores rurais sem condições de adquirirem estações agrometeorológicas completas, possam obter estimativas confiáveis de ET_o para o manejo aproximado da irrigação, utilizando apenas um termômetro de máxima e mínima. Outro fator é que esse método foi ajustado para as condições semiáridas da Califórnia (PEREIRA et al., 1997).

No entanto, na presente pesquisa pelo fato de ter recibo tais classificações, não se recomenda o método de Hargreaves-Samani para estimativas de ET_o para o litoral de Pernambuco, corroborando com Oliveira et al. (2008) para Viçosa-MG, Reis et al. (2007) para Venda Nova do Imigrante-ES, Back et al. (2008) em Urussanga-SC, Bragança et al. (2010) em Cachoeira do Itapemirim, Sooretama e Venda Nova-ES, Tagliaferre et al. (2010) em Eunápolis-Ba, Alencar et al. (2011) em Uberaba e Gavilan et al. (2006), que verificaram piores desempenhos em períodos chuvosos. Tal comportamento possivelmente pode ser explicado pela alta variabilidade das variáveis hidrodinâmicas locais que são utilizadas nos cálculos nos métodos-padrão e que são desconsideradas no método de Hargreaves-Samani, que utiliza apenas valores de temperatura e radiação extraterrestre.

Os resultados diferem dos valores encontrados por vários autores quando compararam o método de Hargreaves-Samani, com outros métodos considerados como padrão, como Penman-Monteith-FAO. Gonçalves et al. (2009) encontraram boa correlação para o município de Sobral no Ceará para o ano de 2006; Souza et al. (2010) e Silva et al. (2011) também encontraram boa correlação da evapotranspiração diária entre os métodos de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith-FAO; os primeiros nos perímetros irrigados do Estado de Sergipe e os demais em Uberlândia-MG.

No entanto, Silva et al. (2003) e Barros et al. (2009), comparando diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) com determinada em lisímetro de pesagem, encontraram desempenho classificado como péssimo para o método de Hargreaves-Samani (1985). Reis et al. (2007) e Silva et al. (2011) também encontraram correlações não satisfatórias da evapotranspiração diária entre os métodos de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith-FAO, os primeiros em Venda Nova do Imigrante, Espírito Santo (ES) e os demais no arquipélago de Fernando de Noronha-PE.

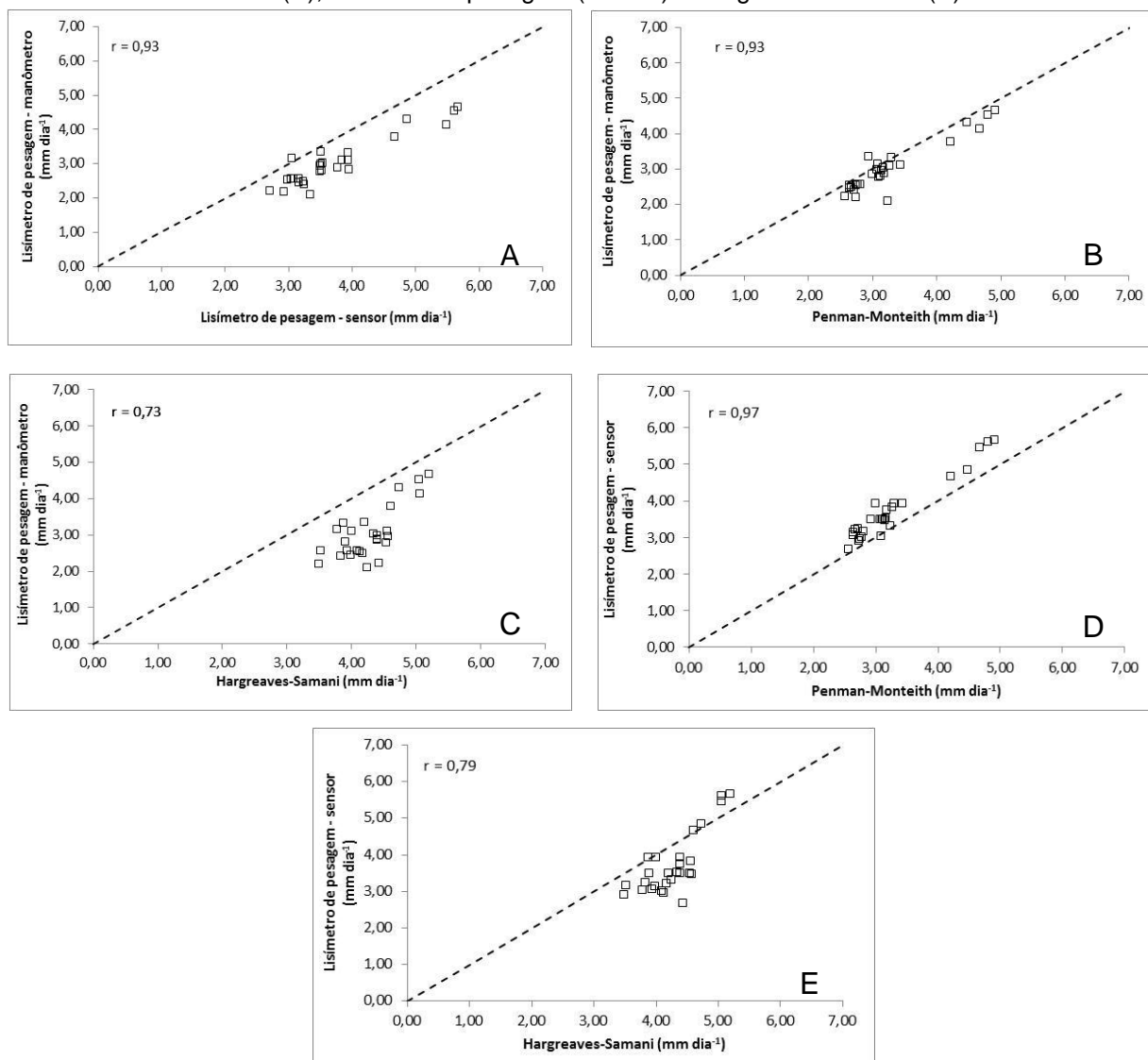
Figura 14 - Análise de correlação da ETo em escala diária entre o Lisímetro de pesagem com diferentes sistemas de leitura (A), lisímetro de pesagem (manômetro) x Penman-Monteith-FAO (B), lisímetro de pesagem (manômetro) x Hargreaves-Samani (C), lisímetro de pesagem (sensor) x Penman-Monteith-FAO (D), lisímetro de pesagem (sensor) x Hargreaves-Samani (E).



Além da análise de desempenho diário, buscou-se avaliar o desempenho dos métodos acumulando a evapotranspiração de cinco em cinco dias durante o mesmo período analisado. Foram organizados 27 agrupamentos de cinco dias consecutivos (37% dos dados possíveis). Pode-se observar que o desempenho de Hargreaves – Samani (1985) quando comparado com o lisímetro de pesagem independente do sistema de leitura Figuras 15C e 15E, não apresentou mudanças significativas, apesar de ter apresentado aumento nos seus índices, bem como uma

redução no erro padrão da estimativa, tendo assim, classificações Péssima e Mal, quando comparado com o lisímetros de pesagem com os sistemas de leitura de pesagem manométricos e para o transdutor de pressão, respectivamente.

Figura 15 - Análise de correlação da ETo em escala quinquenal entre o Lisímetro de pesagem com diferentes sistemas de leitura (A), lisímetro de pesagem (manômetro) x Penman-Monteith-FAO (B), lisímetro de pesagem (manômetro) x Hargreaves-Samani (C), lisímetro de pesagem (sensor) x Penman-Monteith-FAO (D), lisímetro de pesagem (sensor) x Hargreaves-Samani (E).



A Tabela 10 apresenta os valores de correlação dos métodos avaliados em relação ao lisímetro de pesagem com diferentes sistema de leitura, em que optou-se pelo sistema manométrico como método padrão, bem como os valores do coeficiente de concordância de Wilmont (d), de confiança (c), e erro padrão da estimativa e classificação dos métodos de acordo com Camargo e Sentelhas (1997) para investigação da ETo diária e da ETo média a cada 5 dias.

Com exceção do lisímetro de pesagem (sensor) x Penman-Monteith-FAO, houve tendência do lisímetro subestimar os valores de ETo diária em relação aos valores estimados pelos métodos propostos; foi mais considerável a variação observada no método de Hargreaves-Samani (Figura 14 c), que apresentou ajuste com coeficiente angular de 0,63, com valores inferiores em média 37% em comparação às medidas lisimétricas e erros de 0,72 mm dia⁻¹.

Tabela 10 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c), erro médio absoluto (EMA), erro padrão da estimativa (EPE), para análise de correlação entre valores diários de ETo do lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e pelos método de Penman-Monteit e Hargreaves – Samani.

Investigação Diária	r	d	c	EMA (mm dia⁻¹)	EPE	Classificação
Lis. pesagem (mano) x Lis. Pesagem (sensor)	0,84	0,57	0,48	0,20	0,45	Mau
Lis. pesagem (mano) x Penman-Monteith-FAO	0,83	0,79	0,65	0,22	0,47	Mediano
Lis. pesagem (mano) x Hargreaves - Samani	0,49	0,10	0,04	0,52	0,72	Péssimo
Lis. pesagem (sensor) x Penman-Monteith-FAO	0,89	0,78	0,70	0,18	0,43	Bom
Lis. pesagem (sensor) x Hargreaves - Samani	0,55	0,38	0,21	0,63	0,80	Péssimo
Investigação Quinquenal	r	d	c	EMA (mm dia⁻¹)	EPE	Classificação
Lis. pesagem (mano) x Lis. Pesagem (sensor)	0,93	0,53	0,50	0,06	0,26	Mau
Lis. pesagem (mano) x Penman-Monteith-FAO	0,93	0,88	0,82	0,06	0,26	Muito Bom
Lis. pesagem (mano) x Hargreaves - Samani	0,73	0,15	0,11	0,22	0,49	Péssimo
Lis. pesagem (sensor) x Penman-Monteith-FAO	0,97	0,82	0,79	0,04	0,21	Muito Bom
Lis. pesagem (sensor) x Hargreaves - Samani	0,79	0,53	0,42	0,25	0,52	Mau

Foi possível constatar que, de modo geral, as melhores correlações foram obtidas pelo lisímetro de pesagem com sistema de leitura com o transdutor de pressão e o método de Penman-Monteith-FAO (Figuras 14D e 15D e Tabela 10), tanto na escala diária, quanto na quinquenal, tendo em vista o índice de concordância superior aos 78% para todas as condições analisadas e classificação Boa e Muito Boa respectivamente de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

Verificou-se também que a partir dos resultados da análise de correlação dos dados de ETo agrupados em períodos de 5 dias, uma diminuição do erro padrão da estimativa em relação a análise diária, seguidos de maiores coeficientes de correlação e, conseqüentemente, melhores índices de desempenho do métodos

analisados. Esse comportamento também foi observado por Peres et al. (1995), que o atribuíram à inércia apresentada pelos lisímetros em relação à sua drenagem, caracterizando retenção da água livre no solo, viciando as informações coletadas. Os resultados do lisímetro de pesagem com o método de Penman-Monteith-FAO obtidos nesta pesquisa também corroboram a observação de Barros et al. (2009).

6.4 Comparação da evapotranspiração de referência medidas com lisímetro de pesagem com valores estimados a partir de dados do tanque Classe A utilizando-se diferentes métodos de determinação do coeficiente do tanque (Kt)

Na Tabela 11 estão apresentadas as médias mensais da velocidade do vento a 2 m de altura, temperatura do ar, da umidade relativa do ar, saldo de radiação e precipitação para o período analisado.

O coeficiente do tanque Classe A varia de acordo com o local e as condições climáticas (ALLEN et al., 1998). Os fatores meteorológicos apresentados na Tabela 11 interferem diretamente na estimativa da ETo pelo método do TCA. A umidade do ar é uma variável dependente da temperatura, atuando indiretamente nos processos evaporativos. À medida que a temperatura decresce numa mesma proporção que a umidade absoluta de ar, haverá aumento na umidade relativa e queda na evaporação. A velocidade do vento é outro fator importante nos processos evaporativos. O aumento da velocidade do vento e da turbulência do ar faz com que haja a remoção da água, transferindo grandes quantidades de ar acima da superfície evaporante, criando uma condição favorável ao aparecimento de um gradiente de pressão de vapor, aumentando o poder evaporativo local.

Tabela 11 - Resumo médio mensal de velocidade do vento, temperatura média, umidade relativa, saldo de radiação e precipitação pluviométrica em Recife-PE, no período de março de 2013 a fevereiro de 2014.

Meses	V (m s ⁻¹)	T (°C)	UR (%)	Saldo de Radiação (W m ²)	Precipitação Mensal (mm)
Mar/13	0,7	29,0	73,5	129,8	98,6
Abr/13	0,6	28,2	75,5	117,7	223,6
Mai/13	0,5	27,3	77,8	99,5	317,7
Jun/13	0,4	26,3	79,4	74,8	498,3
Jul/13	0,5	25,7	79,1	72,0	416,4
Ago/13	0,7	26,2	76,2	92,1	224,0
Set/13	0,8	26,7	75,2	106,5	146,0
Out/13	0,8	27,7	73,1	128,2	128,5
Nov/13	0,9	28,0	72,3	129,1	76,5
Dez/13	0,9	28,5	73,1	132,5	177,1
Jan/14	0,8	28,2	72,7	136,8	108,9
Fev/14	0,6	28,2	73,9	126,0	150,9

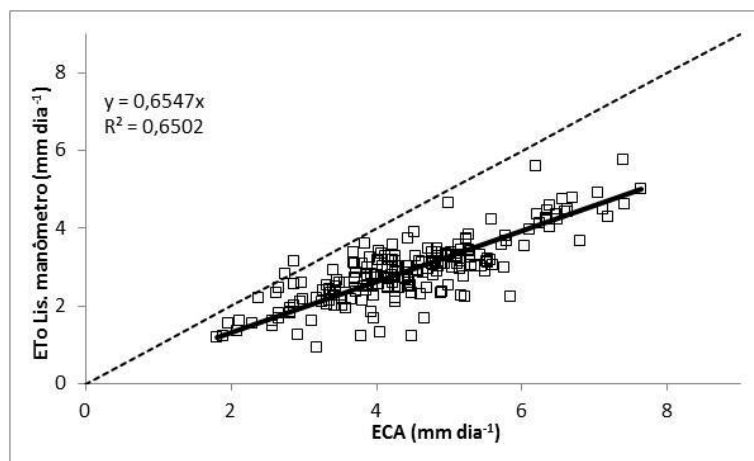
A Figura 16 apresenta o coeficiente médio angular com valor 0,6547 que corresponde ao valor do Kt determinado em função da regressão entre evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro de pesagem com leitura no manômetro (ETo Lisi. Mano) e evaporação do tanque classe A (ECA). Esse valor fixo é uma opção simples e prática de converter ECA em ETo, sem a necessidade de dados como a velocidade do vento, umidade relativa e bordadura. No entanto, este valor deve ser calibrado e testado para cada local sob diferentes condições climáticas.

Cunha et al. (2011) correlacionando dados de ETo estimados por Penman monteith com dados de ECA em condição de campo e ambiente protegido obtiveram valores semelhantes do Kt padrão, 0,65 e 0,58, respectivamente em Botucatu, (SP) durante os meses de Julho e Agosto de 1999. Já Cunha et al. (2013) medindo em Santo Antônio de Goiás o valor médio anual do Kt para o período anual, a partir da relação entre ETo diária estimada pelo método padrão Penman-Monteith-FAO e a ECA, encontraram o valor de 0,7021. No período seco (abril a setembro), o Kt médio foi de 0,6811 e o maior valor de Kt (0,7229) foi obtido durante o período chuvoso (outubro a março).

Em condições de campo, Lima e Moura (2003) obtiveram valores de Kt variando entre 0,54 e 0,81, para o período de junho a dezembro, em Teresina, (PI), com um Kt igual a 0,70 dado pela correlação entre ETo lisímetro e ECA. Em Lajes,

(SC), Cardoso et al. (2003), encontraram um valor de Kt igual a 0,89 para a correlação entre lisímetro e ECA, com variação entre 0,45 e 1,19. Braga et al. (2008) recomenda o valor de Kt igual a 0,55 para todo o ano para a região do Vale do Submédio São Francisco, BA.

Figura 16 - Correlação entre evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro de pesagem com leitura no manômetro (ETo Lisi. Mano) e evaporação do tanque classe A (ECA).



As correlações entre a ETo medida pelo lisímetro de pesagem e a evapotranspiração de referência estimada pelo tanque Classe A (EToTCA) a partir do Kt pelos métodos: Allen, Cuenca, Snyder, Pereira e a correlação entre ETo e ECA, para os dados diários, são apresentadas na Figura 18 e Tabela 12

Observa-se ainda que ocorreu um ajustamento razoável em relação aos coeficientes de determinação ($R^2 \geq 0,64$) para as metodologias avaliadas, concordando com Carvalho et al. (2006) que, comparando métodos para a estimativa da ETo no município de Seropédica, RJ, obtiveram coeficientes com valores semelhantes a estes para o método do TCA. No entanto, a adoção do R^2 como único critério de definição da qualidade de métodos não é adequada, uma vez que esse método não estabelece o tipo e a magnitude das diferenças entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida de diferença do padrão (Barros et al. 2009). Desse modo, a análise dos índices de concordância de Wilmont (d), do erro médio absoluto (EMA), do erro máximo absoluto (EMAX) e da eficiência dos modelos (EF) auxiliam nos resultados.

Verifica-se, na Figura 18, que os coeficientes de correlação (r) variaram entre 0,80 e 0,81, indicando uma boa precisão, ou seja, um baixo desvio dos valores médios diários da evapotranspiração de referência (ETo) obtidos com os valores de Kt estimados pelos métodos estudados, em relação à média dos

mesmos. O menor valor de r foi obtido para os valores de ET_o calculados com o Kt de Pereira (0,80). Para os demais métodos os valores de r obtidos foram 0,81. Esses resultados foram inferiores aos obtidos por Conceição (2002), que obtiveram valores de 0,89 a 0,93 e aos de Braga et al. (2008), que obtiveram valores de 0,91 a 0,99. Valores semelhantes foram obtidos por Sentelhas e Folegati (2003) para as condições de Piracicaba, (SP), com valores situados entre 0,83 e 0,87. Apesar dos resultados satisfatórios obtidos com relação aos valores de r , constata-se pela Tabela 12, que o índice de concordância (d) apresentou resultados satisfatórios apenas quando Kt foi estimado pelos métodos de Pereira et al. (1995) e pelo método do Kt fixo como os valores de 0,78 e 0,81 respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Sentelhas e Folegati (2003) e por Braga et al. (2008).

Por terem apresentado valor de (d) mais próximo de 1 quando comparados aos outros métodos, esses resultados indicam que esses dois métodos permitiram estimar os valores de ET_o com melhor exatidão para o período analisado. Ou seja, com um baixo desvio entre os valores estimados e observados, sendo justificado e observado na Figura 18, em que as retas de regressão dos métodos analisados se localizam próximos da reta 1:1.

Para os demais métodos, os valores de d variaram entre 0,33 e 0,67, o que justifica as retas das regressões desses métodos se distanciarem da reta 1:1 (Figura 18). O menor valor de d foi obtido quando o Kt foi estimado pelo método de SNYDER, o qual foi igual a 0,33, semelhante ao valor encontrado por Braga et al. (2008) e diferente ao encontrado por Conceição (2002) que obteve maior valor de índice de concordância (d) para o método de estimativa de Kt proposto por SNYDER. Essa diferença pode ser explicada devido às condições edafoclimáticas de cada região (McVICAR et al., 2007).

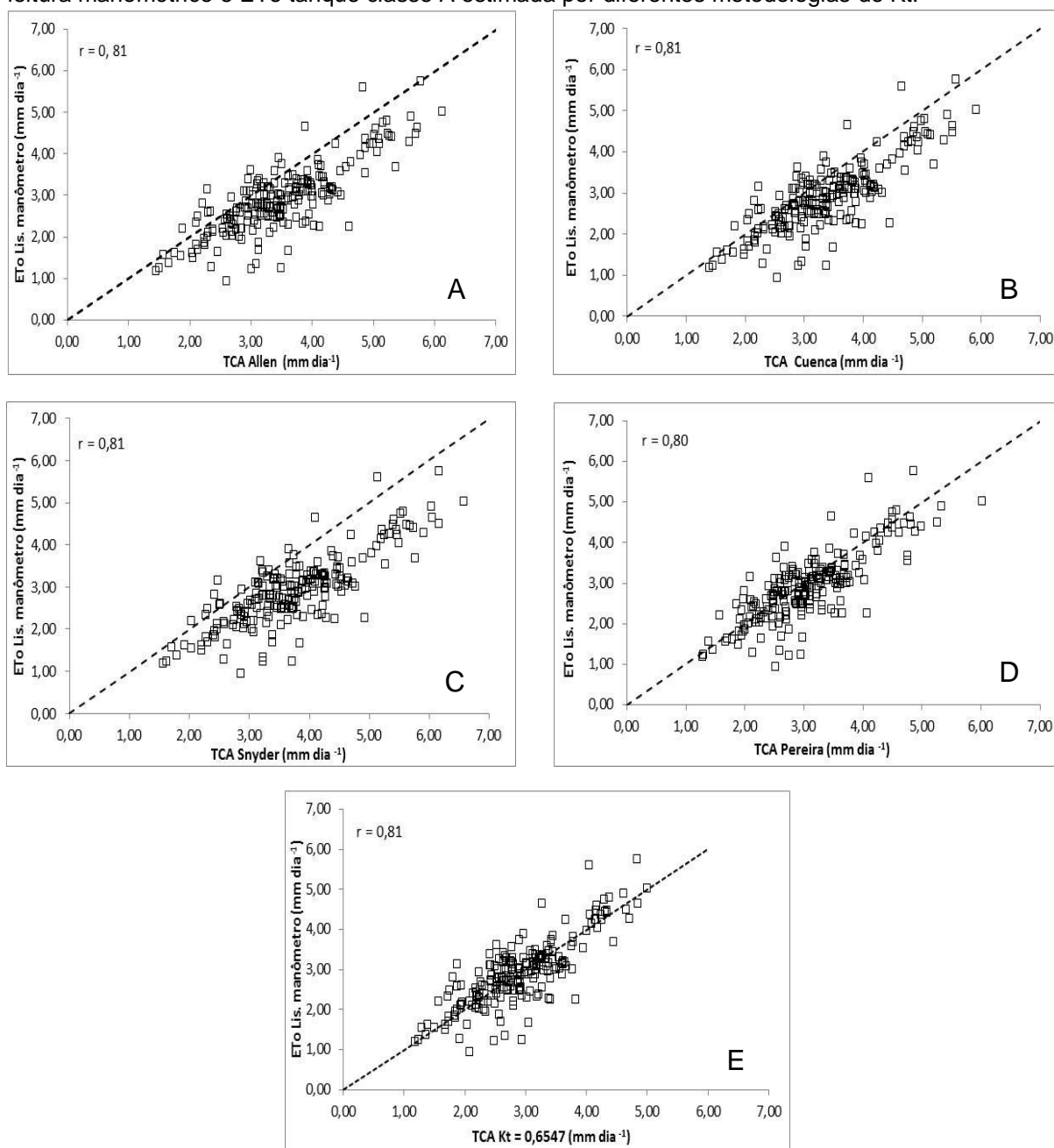
Em relação aos erros de estimativa (EMA E EMAX), constata-se pela Tabela 12, que os melhores resultados foram obtidos quando o Kt foi estimado pelos métodos da correlação Lisímetro x ECA, seguido dos métodos de Allen e Cuenca. Para esses, os erros de estimativa foram de $0,35 \text{ mm dia}^{-1}$ para o erro médio absoluto e de $1,68 \text{ mm dia}^{-1}$ para o erro máximo absoluto.

Esses resultados foram inferiores aos obtidos por Sentelha e Folegatti (2003) que, estimando os valores de ET_o por meio de valores de Kt fixo e de Pereira et al. (1995), obtiveram erros médios absolutos de $0,45$ e $0,42 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente e erros máximos absolutos de $2,07$ e $1,67 \text{ mm dia}^{-1}$

respectivamente, e superiores aos obtidos por Braga et al. (2008) em Juazeiro, (BA), que estimando os valores de ETo por meio de valores de Kt fixo e de Pereira et al. (1995), obtiveram erros médios absolutos de 0,04 e 0,09 respectivamente.

Os valores dos erros de estimativa dos demais métodos variaram de 0,40 a 0,94 mm dia⁻¹ para os erros médios absolutos e de 1,80 a 2,33 mm dia⁻¹ para os erros máximos absolutos. Verifica-se ao analisar os dados diários, que houve uma maior dispersão da ETo obtida pelo método de Snyder, comprovado pelo maior erro médio absoluto (EMA) e erro máximo absoluto (EMAX) (Tabela 12).

Figura 18 – Análise de correlação da ETo diária entre os lisímetros de pesagem com sistema de leitura manométrico e ETo tanque classe A estimada por diferentes metodologias do Kt.



Assim, em ordem decrescente segundo os indicadores estatísticos, coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), erro médio absoluto (EMA), erro máximo absoluto eficiência (EMAX) e eficiência, os métodos de Kt que melhor estimaram a EToTCA em função da ETo medida pelo lisímetro de pesagem foram: Correlação Lisímetro x ECA, Pereira, Cuenca, Allen e Snyder. Os resultados obtidos corroboram com os autores Sentelha e Folegatti (2003) para região de Piracicaba, (SP), Mendonça et al. (2006) para Campos do Goyatacazes, (RJ), Braga et al. (2008) para Região do Vale do Submédio São Francisco, (BA), e Cunha (2011) para Região de Botucatu (SP).

Tabela 12 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), erro médio absoluto (EMA), erro máximo absoluto (EMA) e eficiência (EF), para as correlações entre a ETo medida pelo lisímetro de pesagem e a evapotranspiração de referência estimada pelo tanque Classe A (EToTCA) a partir do Kt pelos métodos: Allen, Cuenca, Snyder, Pereira e Kt fixo.

Método Kt	r	d	EMA	EMAX	EF
			mm dia ⁻¹		
Allen	0,81	0,60	0,64	2,33	0,12
Cuenca	0,81	0,67	0,56	2,17	0,31
Snyder	0,81	0,33	0,94	2,78	0,07
Pereira	0,80	0,78	0,40	1,80	0,59
Kt fixo = 0,6547	0,81	0,81	0,35	1,68	0,65

6.5 Avaliação comparativa dos aspectos construtivos e de manejo dos lisímetros de pesagem hidráulica e de drenagem.

A construção do lisímetro de pesagem foi constituída de duas paredes uma externa de alvenaria e outra interna de fibra de vidro (caixa d' água) sobre uma chapa de ferro, suspensa por perfis metálicos em "U" sobre uma base formada por três células de carga hidráulica, dispostas em forma de triângulo equilátero, o que garantiu uma distribuição equilibrada das forças causadas pelas pressões do solo interno e das lâminas de água dentro do lisímetro. O mesmo era composto por um sistema de leitura manométrico e outro eletrônico através de um transdutor de pressão acoplado a um processador CR1000. As duas paredes possuem sistemas de drenagem distintos e independentes. Este sistema foi similar ao desenvolvido por Silva (2005), Oliveira (2007) e Lima et al. (2013).

Já o lisímetro de drenagem foi constituído apenas de duas paredes: uma externa de alvenaria e outra interna de fibra de vidro (caixa d' água) sobre o solo,

constituído por um sistema de drenagem. Acredita-se que, pelo tipo de solo e pela conformidade e resistência do material, o lisímetro de drenagem poderia ser composto apenas pela parede de fibra (caixa d' água) e sistema de drenagem, o que acarretaria em um menor custo de construção.

Os custos de construção dos lisímetros foram de R\$ 600,00 para o lisímetro de drenagem, incluído mão de obra, a caixa d' água e tubulações para construção do sistema de drenagem e de R\$ 4.900,00 aproximadamente, para o lisímetro de pesagem hidráulica. Esses valores foram superiores aos encontrados por Lima (2012), cujo sistema custou R\$ 4.400,00, por Oliveira (2007), cujo sistema custou R\$ 4.500,00 e de Santos (2004), cujo sistema R\$ 2.800,00. Acredita-se que os valores superiores encontrados neste ensaio se deram principalmente pela adição da chapa metálica que proporcionou uma maior estabilidade do equipamento e pela adição do sistema de drenagem da parede externa para evitar alagamentos na área de manutenção do equipamento.

Ressalta-se que nos dois projetos foram incluídos os custos que envolveram mão-de-obra extra para plantio da grama, tanto nos lisímetros como em parte da área adjacente, materiais de alvenaria e tubulações, mercúrio para o registro das leituras no manômetro, acessórios auxiliares e outros custos casuais.

Uma vez finalizada a construção do lisímetro de drenagem e verificado que a grama tanto nos lisímetros quanto na área adjacente estavam homogêneas, com altura em torno de 0,12 m, chegou-se a conclusão que o equipamento estava pronto para o uso, o que não ocorreu para o lisímetro de pesagem.

Depois de finalizada a sua construção, o lisímetro de pesagem precisou ser calibrado antes de ser utilizado, seguindo orientações de Howell et al. (1995); Campeche (2002); Tolk et al. (2005); Faria et al. (2006); Marek et al. (2006); Evett et al. (2009); Campeche et al. (2011).

Para Campeche (2002), a calibração é uma das etapas mais importantes da implantação do equipamento, pois calibrações mal feitas levam a interpretações inconsistentes dos valores de evapotranspiração, principalmente, quando se trabalha em curtos períodos de tempo.

A calibração também é útil para verificar a linearidade de resposta da célula a cargas e descargas, testar a sua histerese (baseado no carregamento e descarregamento das massas) e avaliar a acurácia do lisímetro, a qual pode ser

relacionada ao erro padrão da estimativa do modelo de regressão (HOWELL et al., 1995; CAMPECHE, 2002; EVETT et al., 2009).

No entanto, conforme salientam Farahani et al. (2007), como existem muitas fontes potenciais de erros inerentes à metodologia, é importante saber quando confiar e duvidar dos dados obtidos nos lisímetros. Os erros relacionados ao sistema de pesagem podem estar associados às células de carga, aos cabos, ao sistema de coleta de dados e a própria estrutura a ser pesada, e estes somente podem ser devidamente avaliados após a realização da calibração e testes (GOMMOLA, 2000).

Em se tratando de manejo, ficou evidente a diferença no tempo de resposta da ETo entre os lisímetros avaliados. O lisímetro de drenagem proporcionou respostas mais precisas a cada 5 dias, enquanto o lisímetro de pesagem a cada hora.

A medição da ETo do lisímetro de drenagem foi obtida através do balanço hídrico de um determinado volume de solo isolado hidrológicamente. Procurou-se manter a variação do armazenamento (ΔA) o menor possível por meio de irrigações frequentes, mesmo em época de chuvas. Apesar de ser realizada a cada cinco dias, verificou-se que o equipamento avaliado poderia dar resposta a partir de 3 dias diferindo de Pereira et al. (1997), Varejão-Silva (2006) e Salassier et al. (2008) que relatam que evapotranspirômetros de drenagem prestam-se melhor à determinação da evapotranspiração média em intervalos de sete a dez dias. Para Varejão-Silva (2006) não se poderia pensar em usar esses lisímetros para períodos menores porque a maioria das espécies vegetais não resistiria muito tempo sob condições de excessiva umidade no solo.

Segundo Pereira et al. (1997), a falta de precisão nos resultados obtidos desses equipamentos, em períodos curtos (menores que sete dias) de avaliações, se deve principalmente a redistribuição da água no perfil do solo que acontece de forma lenta. Segundo esses autores, nesse tipo de lisímetros, deve-se procurar manter a variação do armazenamento (ΔA) o menor possível por meio de irrigações. No entanto, a percolação frequente resulta em lixiviação de nutrientes, e deve-se tomar cuidado em repô-los na dosagem adequada para não causar crescimento diferenciado das plantas dentro e fora do lisímetro.

Bernardo et al. (2008) relatam que, pelo fato do movimento de água no solo ser um processo relativamente lento, os lisímetros de percolação somente tem

precisão para períodos mais ou menos longos. A ETo, determinada por estes dispositivos, deve ser em média semanais, quinzenais ou mensais. Eles precisam ser irrigados diariamente ou a cada dois dias, com determinada quantidade de água, de forma que a água percolada seja em torno de 10% do total aplicado nas irrigações.

Nos lisímetros de pesagem, a evapotranspiração, bem como os outros componentes do balanço hídrico, pode ser determinada por meio do monitoramento da variação de massa do lisímetro.

Para Farahani et al. (2007) e Bryla, Trout e Ayars (2010), a lisimetria de pesagem é reconhecidamente a melhor técnica para se determinar a evapotranspiração. Estes envolvem vários equipamentos e princípios de pesagem, podendo utilizar desde sistemas mecânicos, eletrônicos ou diretos (baseados na utilização de células de carga), mistos (mecânico combinado com eletrônico) e até sistemas hidráulicos (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL, 2004).

Segundo Allen et al. (1991), Silva et al. (1999) e Allen et al. (2011), os lisímetros equipados com mecanismos de pesagem por células de carga são os mais modernos e permitem a realização de medidas automatizadas com células de carga instaladas sob a caixa impermeável e são geralmente acopladas a um sistema de aquisição de dados, fornecendo resultados mais confiáveis, e possibilitam a obtenção de medidas em escala horária, representando grande vantagem em relação aos demais tipos de lisímetros, que não teriam como coletar e armazenar os dados desta forma.

Para Howell (2004) e Allen et al. (2011), a qualidade das medidas de evapotranspiração depende em grande parte da resolução do sistema de pesagem, da faixa de medição do mesmo, da existência ou não de contrapesos e da relação área/volume do lisímetro. No entanto, apesar de precisos, os dois lisímetros apresentaram alguns problemas de operação. As principais dificuldades operacionais foram verificadas em dias com chuvas intensas, em sequência de dias com chuvas intermitentes. Para o lisímetro de pesagem verificava-se diferenças entre a precipitação captada pelo lisímetro e pelo pluviômetro instalado ao lado. O sistema de captação da água de drenagem dos lisímetros não suportava o volume drenado o que acarretava na perda dos dados.

Pereira et al. (2002) comentam que dificuldades operacionais no lisímetros em geral são verificadas em dias com chuvas intensas, em sequência de

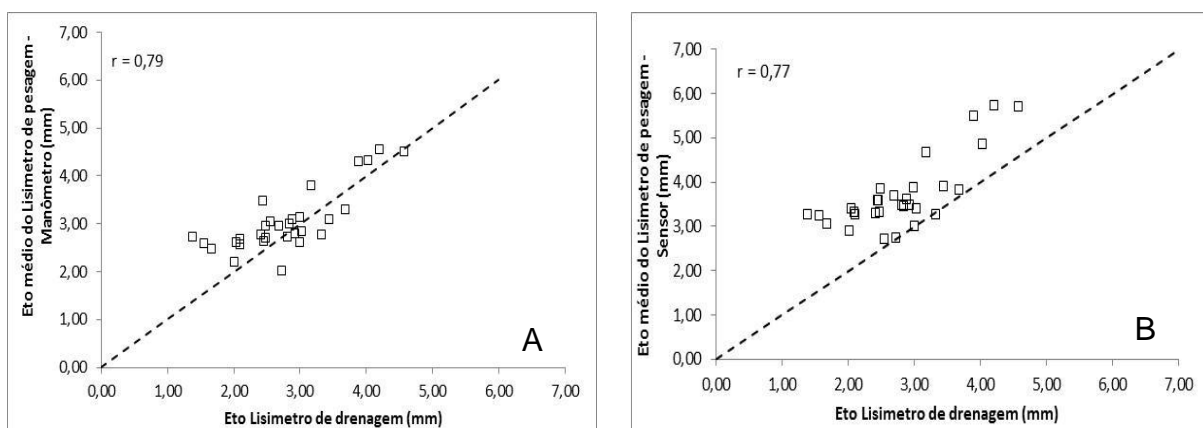
dias com chuvas intermitentes e também em dias sem chuvas, mas com ventos intermitentes. Os autores concluíram que medidas de ETo em intervalos inferiores a 60 minutos em lisímetros de pesagem nem sempre são tão exatas quanto se espera de um sistema admitido como padrão.

Para Flumignan (2011), antes de utilizar os lisímetros de pesagem para estudar o consumo hídrico de uma cultura, se torna conveniente promover alguns testes que permitam conhecer melhor o equipamento. Este procedimento aumenta o poder de decisão sobre quais dados são confiáveis e quais devem ser corrigidos ou, até mesmo, excluídos. No entanto, na maioria dos lisímetros construídos, esta fase de testes tem sido ignorada e, portanto, a confiabilidade dos dados destes equipamentos muitas vezes pode ser questionada.

Na Figura 19 estão apresentados os gráficos e os modelos resultantes da regressão linear da evapotranspiração média quinquenal submetida a análise comparativa entre o método padrão (lisímetro de pesagem com os sistemas de leitura manométricos), bem como do lisímetro de pesagem hidráulica com transdutor de pressão e o lisímetro de drenagem para o período de março de 2013 a fevereiro de 2014, totalizando 30 comparações (41% dos dados possíveis). Com a análise comparativa, obteve-se o índice de correlação (r), o índice de concordância (d), índice de confiança (c), o erro absoluto médio (EAM), erro relativo médio e Erro padrão da estimativa (EPE).

Nota-se que na Figura 19 e Tabela 13 que os valores de ETo medidos com o lisímetro de drenagem tiveram desempenho satisfatórios, apresentando desempenho classificado como “Muito Bom” na escalas analisada independente do sistema de leitura do lisímetro de pesagem.

Figura 19 - Análise de correlação da ETo em escala quinzenal entre os lisímetros de pesagem com o sistema de leitura manométrico x lisímetro de drenagem (a) e entre os lisímetros de pesagem com o sistema de leitura com o transdutor de pressão x lisímetro de drenagem (b).



Quando são comparados dados de evapotranspiração de referência medidas por diferentes lisímetros, espera-se que os resultados apresentem boas correlações. No entanto, poucos trabalhos na literatura relatam sobre tal comportamento. Silva et al. (2003) e Santos et al. (2008), avaliando a ETo diária sob condições do semiárido nordestino, obtiveram os parâmetros de avaliação semelhantes aos do presente estudo, proporcionando desempenho Muito Bom, entre medidas com lisímetro de pesagem hidráulica e o modelo de Penman-Monteith-FAO. Já Oliveira (2007), avaliando a ETo medidas de 23 observações na escala pentada, na zona da mata de Pernambuco encontrou parâmetros de avaliação inferiores aos do presente estudo ($r = 0,88$; $d = 0,81$; $c = 0,73$), obtendo um desempenho classificado como Bom, entre medidas com lisímetro de pesagem hidráulica e o modelo de Penman-Monteith-FAO.

Outros autores como Trajkovic & Kolakovic (2009), Barros et al. (2009), Souza et al. (2011) e Melo et al. (2013) também verificaram boa correlação entre o lisímetro de pesagem e a metodologia de Penman-Monteith-FAO da FAO através dos indicadores estatísticos empregados. No entanto, Moura (2009), analisando estatisticamente a correlação entre os dados obtidos através do lisímetro de drenagem e os estimados pelo método de Penman-Monteith-FAO FAO-56, nas escalas diárias, decendial e quinzenal, verificou que, do ponto de vista do desempenho o resultados não foram satisfatórios, apresentando desempenho classificado como “Péssimo” em todas as escalas analisadas.

Tabela 13 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de desempenho (c), erro médio absoluto (EMA), erro padrão da estimativa (EPE), para as equações de regressão entre valores médios quinquenais de ETo do lisímetro de pesagem hidráulica com diferentes sistemas de leitura e pelo Lisímetro de drenagem.

Método	r	d	c	EMA mm dia⁻¹	EPE	Classificação
Lis. de drenagem	0,79	0,73	0,58	0,16	0,41	Sofrível
Lis. de drenagem	0,77	0,28	0,22	0,25	0,52	Péssimo

7 CONCLUSÕES

As equações de calibração apresentaram um alto coeficiente de determinação. O lisímetro de pesagem hidráulica automatizado apresentou excelente estabilidade, sensibilidade, resolução e exatidão, detectando variações de massa devido à chuva, irrigações e evapotranspiração, mostrando-se adequados para o estudo da demanda hídrica.

O lisímetro de pesagem hidráulica automatizado calibrado e recalibrado ao longo do ano na região litorânea de Pernambuco mediu representativamente a evapotranspiração de referência, quando comparado com os métodos do Tanque Classe A, Penman Monteith e Hargreaves-Samani em diferentes escalas.

A melhor metodologia encontrada para o cálculo do K_t utilizado pelo método do tanque Classe A, no litoral de Pernambuco, foi a proposta por Pereira et al.(1995), obtendo uma maior eficiência.

O uso de um valor constante de K_t mostrou ser uma opção simples e prática para converter ECA em ET_o . No entanto, este valor deve ser calibrado e testado para diferentes condições climáticas.

O lisímetro de drenagem teve um menor custo construtivo. Entretanto, em se tratando de manejo, ficou evidente a diferença no tempo de resposta da ET_o em que o lisímetro de drenagem proporcionou respostas mais precisas a partir do quinto dia, enquanto o lisímetro de pesagem independente do sistema de leitura a cada hora.

Os valores de ET_o medidos com o lisímetro de drenagem tiveram desempenho satisfatórios quando comparado com o lisímetro de pesagem na escala analisada independente do sistema de leitura utilizado.

8 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que, na construção dos lisímetros tanto de pesagem quanto de drenagem, o espaço entre este e a caixa interna e externa de alvenaria, seja inferior ou igual a 5 cm, esta medida permitirá que ambos não se toquem, nem extrapole a relação (área de borda / área superficial). Isso garantirá que possíveis declínios laterais não afetem as medidas.

Se optar por caixa interna feita de fibra de vidro (caixa d' água), recomenda-se a retirada da bordadura superior das mesmas. Isso possibilitará que a área útil do equipamento seja superestimada.

Recomenda-se para os lisímetros de pesagem hidráulica a adição de uma chapa metálica sobre o sistema de pesagem. Isso possibilitará uma maior superfície de contato, maior estabilidade e eficiência do equipamento.

É fundamental, um sistema de drenagem para as paredes externas do lisímetro. Essa medida evitará possíveis danos principalmente ao sistema de pesagem, provocado pelas águas da chuva ou pela elevação do lençol freático.

Recomenda-se para a transmissão do fluido, a utilização de mangueiras de nylon rígida, e sistemas de engate rápido da tubulação. Essa medida possibilitará que o sistema de leitura não sofra com oscilações causadas pela dilatação ou contração das mangueiras com a variação da temperatura e/ou pressão.

Recomenda-se a automação das leituras através de sensores de pressão hidrostática em lisímetros hidráulicos, pois este se mostrou sensível ao medir as variações de massa com boa exatidão em diferentes escalas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que, nos primeiros anos de instalação do lisímetro de pesagem, além da verificação do desempenho através das calibrações e determinação dos erros ao longo do ano, é primordial que determine também os valores de capacidade de campo, pois, verificou-se uma variação da mesma ao longo do ensaio.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHALED, A; ALFARO, A; SMITH, M. Lysimeters - FAO Irrigation and Drainage.paper 39. Rome, 68 p. 1982

ALBUQUERQUE FILHO, J.A.C. Eficiência do uso da água no cultivo do coentro e da salsa na presença de um polímero hidroabsorvente. Campina Grande, Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 107 p. 2006.

ALENCAR, L.P.; DELGADO, R.C.; ALMEIDA, T.S.; WANDERLEY, H.S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife, v.6, n.2, p.337-343, 2011.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 98, p. 899-920, 2011.

ALLEN, R.G.; FISHER, D.K. Direct load cell based weighing lysimeter system. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O.; WALTER, I.A.; JENSEN, M.E. (Ed.). Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. New York: American Society of Civil Engineers, p. 114-124. 1991.

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

ALMEIDA, B. M.; ARAÚJO, E. M.; CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; OLIVEIRA, J. B.; ARAÚJO, E. M.; NOGUEIRA, B. R. C. Comparação de métodos de estimativa da ETo na escala mensal em Fortaleza-CE. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, v. 4, n. 2, p. 93–98, 2010.

BATTISTON, C.C. & TUCI, C.E.M. Evaporação e evapotranspiração. Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, UFRGS, 2003. Notas de aulas. Disponível em:<<http://www.iph.ufrgs.br>>.

BARBIERI, V. Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*). 1981. 82p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) ESALQ/USP. Piracicaba, 1981.

BARROS, V.R.; SOUZA, A.P.; FONSECA, D.F.; 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, v.4, p.198-203, 2009.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre: IPAGRO/Secretaria de Agricultura, Boletim técnico 7. p 95.1981.

BEZERRA, A. H. F.; LEVIEN, S. L. A.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; RIBEIRO, G. B. Determinação da evapotranspiração de referência: soma de cálculo horário versus cálculo diário. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 17, Mossoró - RN. Anais... Mossoró - RN: ABID, 2007. (CD-ROM)

BACK, A.J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. Irriga, Botucatu, v.13, n.4, p.449-466, 2008.

BLACK, T.A; THURTELL, G.W; TANNER, C.B. Hydraulic load-cell lysimeters, construction, calibration and tests. Soil Science Society American Proceedings, v. 32, p. 623-629. 1968.

BLOON, A. J. Principles of instrumentation for physiological ecology. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A. et al. (Ed) Plant physiological ecology: field methods and instrumentation. London: Chapman and Hall, p.1-13. 1992.

BRAGANÇA, R.; REIS, E.F.; GARCIA, G.O.; PEZZOPANE, J.E.M. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no estado do Espírito Santo. Idésia, Arica, v.28, n.2, p.21-29, 2010.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M., MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F. Coeficientes do tanque classe "A" para estimativa da evapotranspiração de referência na região do Vale do Submédio São Francisco, estado da Bahia. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.16, n.1, p.49-57, 2008.

BRYLA, D.R.; TROUT, T.J.; AYARS, J.E. Weighting lysimeters for developing crop coefficients and efficient irrigation practices for vegetable crops. HortScience, Alexandria, v. 45, n. 11, p. 1597-1604, 2010.

CAMARGO, A.P. CAMARGO, M.B.P.; Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Bragantia, Campinas. v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CAMARGO, Â. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.5, n.1 p.89-97, 1997.

CAMPECHE, L.F.S.M. Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida "Tahiti" (*Citrus latifolia* Tan.). Tese (Doutorado) em Agronomia – Irrigação e Drenagem, ESALQ- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 67 p.2002.

CAMPECHE, L.F.S.M.; 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, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CARDOSO, C. O.; ULLMANN, M. N., EBERHARDT, E. L. Obtenção do coeficiente do tanque evaporimétrico para estimativa da evapotranspiração para Lages-SC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13, 2003. Santa Maria: Anais... Santa Maria-RS. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2003. CD Rom

CARVALHO, S. M., STIPP, N. A. F. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: Uma proposta de classificação qualitativa. Geografia, Londrina, v.13, n.1. 2004.

CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CRUZ, F.A.; SOUZA, A.P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. Engenharia Agrícola, v.27, p.363-372, 2007.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Reference evapotranspiration based on class A pan evaporation. Scientia Agrícola, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 417-420, 2002.

CONCEIÇÃO, M.A.F. & MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005.

COSTA, M.S.V. Determinação da evapotranspiração de referência por evapotranspirômetro de pesagem hidráulica com arranjo de pistão de mercúrio. Dissertação (Mestrado) em Agronomia – Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 81 p. 1999.

CUENCA, R. H. Irrigation system design: an engineering approach. New Jersey: Prentice-Hall, 133 p. 1989.

CUNHA, A. R. Coeficiente do tanque Classe A obtido por diferentes métodos em ambiente protegido e no campo. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 32, n. 2, p. 451-464, abr/jun. 2011.

CUNHA, P. C. R.; NASCIMENTO, J. L.; SILVEIRA, P. M.; ALVES, J. J. Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. Pesqui. Agropecu. Trop. vol.43 n^o.2 Goiânia Apr./June 2013.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. Efeitos da água no rendimento das culturas. Roma: FAO, 1994. 212 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 24, 2nd ed., Rome, 179p. 1977.

EVETT, S.R.; MAZAHRIH, N.T.; JITAN, M.A.; SAWALHA, M.H.; COLAIZZI, P.D.; AYARS, J.E. A weighing lysimeter for crop water use determination in the Jordan Valley, Jordan. Transactions of the ASABE, St. Joseph, v. 52, n. 1, p. 155-169, 2009.

FARAHANI, H.J.; HOWELL, T.A.; SHUTTLEWORTH, W.J.; BAUSCH, W.C. Evapotranspiration: progress in measurement and modeling in agriculture. Transactions of the ASABE, St. Joseph, v. 50, n. 5, p. 1627-1638, 2007.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. Rev. Bras. de Eng^a. Agric. e Ambiental. v.10, n.1, p. 237-242. 2006.

FEITOSA, D. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; SANTOS, G. O. Evapotranspiração de referência calculada à intervalos de dados horários e diário. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 21, Petrolina - PE. Anais... Petrolina - PE: ABID, 2011. (CD-ROM).

FLUMIGNAN, D. L. Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão manso (*Jatropha curcas L.*). Tese (Doutorado) em Ciências. ESALQ-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – Universidade de São Paulo. 202 p. 2011.

FRANCO, R. A. M.; HAGA, K. I.; HERNANDEZ, F. B. T. Evaporação do solo mais transpiração vegetal igual a evapotranspiração. Unesp, São Paulo, 2007.

FREITAS, J.A.G. Evapotranspirômetro de pesagem por sensor de carga hidráulica: construção, calibração e testes. Dissertação (Mestrado) em Agronomia. Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 122 p. 1994.

GAVILÁN, P.; LORITE, I.J.; TORNERO, S.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, v.81, p.257-281, 2006.

GONÇALVES, F.M., FEITOSA, H.O., CARVALHO, C.M., GOMES FILHO, R.R., VALNIR JÚNIOR, M. “Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral-CE”. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.3, n.2, p.71-77. 2009.

GRAZHDANI, S.; AHMETI, A.; BITRI, M. An evaluation and comparison of reference crop evapotranspiration in climatic conditions of albania. *Natura Montenegrina*, Montenegro, v. 9, n. 3, p.937-950, 2010.

GOMMOLA, G. The application and installation of load cells. Frankfurt: Zarbock, 178 p. 2000.

GUNDEKAR , H. G. et al. Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for semi-arid region. *Irrigation Science*, New York, v. 26, n. 2, p. 169-175, 2008.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering Agriculture*, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HOWELL, T.A. Lysimetry. In: HILLEL, D. (Ed.). *Encyclopedia of soils in the environment*. Oxford: Elsevier, p. 379-386, 2004.

HOWELL, T. A. Lysimetry. In: HILLEL, D. (Ed.). *Encyclopedia of soils in the environment*. Oxford: Elsevier P. 379-386, 2004.

HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; DUSEK, D.A.; MAREK, T.H.; STEINER, J.L. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v. 38, n. 4, p. 1019-1024, 1995.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter desing and use for evapotranspiration measurements. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements. New York: American Society of Civil Engineers, p. 1-9. 1991.

JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. Transactions of the ASAE, v. 14, p. 954-959, 1971.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1990. 332p.

KOHNKE, H.; DREIBELBIS, F. R.; DAVIDSON, J. M. A survey and discussion of lysimeters and bibliography on their construction and performance. Miscelaneus. Publication, n.372, 68p. 1940.

LIMA, J.E.F.W.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A. da S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 5, n.1, p.33-41, 2001.

LIMA, M. G., MOURA, G. C. Coeficiente de tanque classe "A" e evapotranspiração de referência medida e estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13, 2003. Santa Maria: Anais... Santa Maria-RS. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2003, CD Rom.

LIMA, N. S. Construção, instalação e calibração de lisímetros para a determinação da evapotranspiração de referência na região do litoral de Pernambuco. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 43p. Dissertação de Mestrado 2012.

LIMA, N. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J.A.C.; SILVA, E F. F.; MONTENEGRO, A. A. A; NASCIMENTO, A. H. C. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com transdutor de pressão hidrostática e sistema manométrico. Irriga, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 540-557, julho-setembro, 2013.

MAKKINK, G. F. Ekzameno de la formula de Penman. Netherlands Journal of Agricultural Science, v.5, p.290-305, 1957.

MALONE, R.W.; STEWARDSON, D.J.; BONTA, J.V.; NELSEN, T. Calibration and quality control of the Coshocton weighing lysimeters. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 42, n. 3, p. 701-712, 1999.

MAREK, T.; PICCINNI, G.; SCHNEIDER, A.; HOWELL, T.; JETT, M.; DUSEK, D. Weighing lysimeters for the determination of crop water requirements and crop coefficients. Applied Engineering in Agriculture, St. Joseph, v. 22, n. 6, p. 851-856, 2006.

MELO, T. K.; MEDEIROS, J. F.; SOBRINHO, J. E.; FIGUEIREDO, V. B.; SOUZA, P. S. Evapotranspiration and crop coefficients of melon plants measured by lysimeter and estimated according to FAO 56 methodology. Eng. Agríc. vol.33 no.5 Jaboticabal Sept./Oct. 2013.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; ANDRÉ, R. G. B.; BERNARDO, S. Coeficientes do tanque Classe A para estimativa da evapotranspiração de referência em Campos dos Goytacazes, RJ. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Piracicaba, v. 14, n. 1, p. 123-128, 2006.

MIRANDA, F. R.; YODER, R. E.; SOUZA, F. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 107-110, 1999.

MORAES, M.F. Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental/representativa de Santa Maria/Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 233f. 2007.

MOURA, A. R. C. Estimativa da Evapotranspiração de Referência em bacia experimental na região Nordeste. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 111p. Dissertação de Mestrado. 2009.

NASCIMENTO, E.F.; CAMPECHE, L.F.S.M.; BASSOI, L.H.; SILVA, J.A.; LIMA, A.C.M.; PEREIRA, F.A.C. Construção e calibração de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo em videira de vinho cv. Syrah. Irriga, Botucatu, v.16, n.3, p.271-287, 2011.

OLIVEIRA, L.M.M. Avaliação da evapotranspiração de referência (ET_o) na bacia experimental do riacho Gameleira – PE, utilizando lisímetro de pesagem hidráulica e métodos indiretos. Recife, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 111p. 2007.

OLIVEIRA, R.A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDIYAMA, G.C.; MATERAM, F.J.V.; CECON, P.R. Desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.12, n.2, p.166-173, 2008.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of Royal Society of London. Série A, London, v.193,p.120- 145,1948.

PENMAN, H. L. Evaporation : an Introductory Survey. Neth. J. Agric. Sci, n. 4, p.9 – 29. 1956.

PEREIRA, A.R; VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.S.; BARBIERI, V. A model for the class A pan coefficient. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdam, v.76, p.75-82, 1995.

PEREIRA, A.R; VILLA NOVA, N.A; SEDIYAMA, G. C. Evapo(trans)piração. Piracicaba: FEALQ, 183 p.1997.

PEREIRA, A.R.; SANTIAGO, A.V.; MAGGIOTTO, S.R.; FOLEGATTI, M.V. Problemas operacionais com lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 51-56, 2002.

PERES, J.G.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J.A. Avaliação do modelo de Penman-Monteith-FAO para estimativa da evapotranspiração potencial de referência padronizada pela FAO. Revista Engenharia Rural, Piracicaba, v.6, n.1, p.65-77, 1995

PERES, J. G., SCÁRDUA, R., VILLA NOVA, N.A. Coeficiente de cultura (kc) para cana-de-açúcar: ciclo de cana soca. Álcool e Açúcar, v.62, p.34-42, 1992.

PRUITT, W. O.; LOURENCE, F. G. Experinces in lysimeter for ET and surface drag measurements. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985: Advances in evapotraspiration: proceedings. St. Joseph: ASAE, p.51-69. 1985.

RAUDKIVI, A.J. Hydrology: an advanced introduction to hydrological processes and modelling. New York: Pergamon, p.479. 1979.

REICHARDT, K.; TIMM, L C. Solo, Planta e Atmosfera:conceitos, processos e aplicações, 2ª ed. v. 1, p.500. 2012.

REIS, E.F.; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G.O. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do Estado do Espírito Santo no período seco. Idesia, Arica, v.25, n.3, p.75-7854, 2007.

SALASSIER, B.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. Manual de irrigação. 8 ed. Viçosa: UFV. 625p. 2008.

SANTOS, F.X. Lisímetro de pesagem hidráulica e evapotranspiração de referência por diversos métodos no Agreste Pernambucano. Dissertação (Mestrado) em Agronomia – Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, 74 p. 2004.

SANTOS, F.X.; RODRIGUES, J.J.; MONTENEGRO, A.A.A. MOURA, R.F. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino”. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.28, n.1, p.1155-124. 2008.

SCHMIDT, C. D. S.; Pereira, F. A. C.; Oliveira, A. S.; Gomes, J. F. & Vellame, L. M. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. Water Resources and Irrigation Management. Cruz das Almas, BA. v.2, n.2, p.77-85, May-Aug., 2013.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. Revista Brasileira Agrometeorologia, Santa Maria, v.4, n.1. p. 1-12p. 1996.

SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. Irrigação. Piracicaba: Funep, p. 63-120. 2001.

SENTELHAS, P. C., PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L.R. Meteorologia Agrícola. Piracicaba–SP. Universidade de São Paulo. Departamento de Ciências Exatas, fevereiro, p 46-70. 1999.

SENTELHAS, P. C.; FOLEGATTI, M. V. Class A pan coefficients (Kt) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.1, p.111-115, 2003.

SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-58, 1999.

SILVA, K.C.M. Avaliação do manejo da irrigação por microaspersão da cultura do repolho em região semi-árida. Dissertação (Mestrado) em Engenharia de Recursos Hídricos. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife - Pernambuco, p.84. 2003.

SILVA, L.D.B.; FOLEGATTI, M.V.; VILLA NOVA, N.A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.

SILVA, T.J.A. Aplicação de evapotranspirômetro de pesagem no estudo de relações entre a evapotranspiração de referência medida e estimada no semi-árido Nordeste. Dissertação (Mestrado) em Agronomia – Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife – Pernambuco, p.97. 2000.

SILVA, T.J.A., MONTENEGRO, A.A.A., RODRIGUES, J.J.V., BONFIM, E.M.S. “Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina-PE”. Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.23, n.3, p.511-520. 2003.

SILVA, T.J.A. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo método do Balanço de Radiação e lisimetria de pesagem hidráulica. Tese (Doutorado) em Agronomia. ESALQ- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo. p.98. 2005.

SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; SILVA, C. R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R. E. F. “Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG”. Biosci. J., Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 95-101. 2011.

SMITH, M. Report on expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome, FAO, 45p. 1991.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. Journal of Irrigation and Drainage Engineering of ASCE, New York, v. 118, n. 6, p. 977-980, 1992. 977-980, 1992.

SOUSA, I. F. de; SILVA, V. de P. R.; SABINO, F. G.; NETTO, A. de O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. de. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 633-644, 2010.

SOUZA, A. P. de; CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. B. D. da; ALMEIDA, F. T. de; ROCHA, H. S. da. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.46, n.3, p.219-228, 2011.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. de J; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. da C.; SILVA, C. dos S. da. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. Caatinga, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TANNER, C. B.; JURY, W.A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. Agronomy Journal, Madison, v.68, p.239-243, 1976.

THORNTHWAITE, C.W. "An approach toward a rational classification of climate". Georg. Review, New York, v. 38, n. 1, p.55-94. 1948.

TOLK, J.A.; HOWELL, T.A.; EVETT, S.R. An evapotranspiration research facility for soilplant- environment interactions. Applied Engineering in Agriculture, St, Joseph, v. 21, n. 6, p. 993-998, 2005.

TOMASELLA e ROSSATO. Balanço Hídrico. Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas. INPE-13140-PRE/8399. 2005.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. Water Resource Management, Amsterdam, v. 23, n. 14, p. 3057-3067, 2009.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia Ciência e Aplicação. Editora UFRGS, EDUSP ABRH 952p. 1993.

TUCCI, E. M. et al. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4ª edição. Porto Alegre. Editora da UFRGS/ABRH. p 269, 270, 277, 278. 2007.

TURCO, J. E. P.; PERECIN, D; PINTO JÚNIOR, D. L. P. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. Botucatu, SP. Irriga, v.13, n.1, p.63-80, 2008.

UNESCO. Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur. Montevideu, Uruguai. p.130. 1982.

VAREJÃO-SILVA, M.A. Meteorologia e Climatologia. Recife : 2006. Versão Digital.

VAUGHAN, P.J.; AYARS, J.E. Noise reduction methods for weighing lysimeters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 135, n. 2, p. 235-240, 2009.

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A.G.; VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P.C.; CLEARY, R.W. *Engenharia hidrológica*, Rio de Janeiro, ABRH, Cap. 3, p. 145-97. 1989.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005. 1985.

APÊNDICES

APÊNDICE A – VALORES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA OBTIDA POR DIFERENTES MÉTODOS E EVAPORAÇÃO DO TANQUE CLASSE A (mm)

Dias	ETO Penman- Monteith- FAO.	ETO Sensor	ETO Manometro	Precipitação	ECA	Eto Hargreaves
9-mar	2,93	3,40	2,73	0,6	4,4	2,98
10-mar	3,48	4,15	3,28	1,2	5,0	3,96
12-mar	4,02	4,60	3,69	0	5,8	4,56
13-mar	4,58	5,27	4,37	0	6,2	4,47
16-mar	3,91	3,58	2,26	0,2	5,2	3,97
17-mar	3,48	3,98	3,17	0,4	4,6	4,86
21-mar	4,75	5,23	4,50	0	7,1	5,30
22-mar	4,79	5,87	4,45	0	6,6	5,31
23-mar	4,83	5,76	4,49	0	6,6	5,09
24-mar	5,00	5,47	5,03	0	7,6	4,98
25-mar	5,18	5,98	4,91	0	7,0	5,24
26-mar	4,94	5,69	3,70	0	6,8	4,91
27-mar	4,71	5,61	4,38	0	6,5	5,12
28-mar	4,65	5,55	4,29	0	7,2	5,27
29-mar	4,56	5,34	4,24	0	5,6	5,16
30-mar	4,47	5,20	4,16	0	6,2	4,78
31-mar	4,76	5,47	4,25	0	6,3	4,67
1-abr	5,04	5,96	4,65	0	7,4	5,09
4-abr	5,10	5,87	4,80	0	6,7	4,68
5-abr	4,84	5,77	4,76	0	6,6	5,03
6-abr	4,58	5,36	4,26	0	6,3	5,00
7-abr	4,80	5,92	4,42	0	6,6	5,20
8-abr	4,69	5,13	4,48	0	6,3	5,30
9-abr	4,58	5,36	4,26	0	6,5	4,71

10-abr	4,31	4,64	3,98	0	6,1	4,92
11-abr	4,75	4,24	3,55	1	6,0	4,75
12-abr	4,48	5,15	4,05	0	6,4	4,64
13-abr	4,22	4,91	5,77	3	7,4	4,62
14-abr	4,10	5,23	3,82	0,8	5,8	4,28
15-abr	3,99	4,52	3,71	0	5,2	4,10
16-abr	4,55	5,33	4,61	0	6,4	5,18
17-abr	4,01	3,44	3,08	0	5,6	4,51
18-abr	4,38	4,81	3,75	0	5,2	4,94
26-abr	3,87	4,53	3,45	1,7	5,3	4,25
ETO						
Dias	Penman-Monteith-FAO.	ETO Sensor	ETO Manometro	Precipitação	ECA	Eto Hargreaves
27-abr	3,59	4,28	3,34	3,5	5,0	3,88
3-mai	3,55	4,15	3,47	0,6	5,2	3,87
4-mai	3,52	4,07	3,10	0	4,9	4,37
5-mai	3,64	4,50	3,44	0	5,3	4,16
6-mai	3,04	2,96	2,31	2,8	4,6	3,41
7-mai	3,40	3,99	3,27	0,2	5,3	4,17
8-mai	3,58	3,90	3,58	0	4,2	4,36
9-mai	3,43	3,83	3,11	0	4,9	4,03
13-mai	2,83	3,33	2,72	0,3	4,2	2,88
15-mai	2,10	2,47	1,86	1,8	2,8	2,92
20-mai	3,17	3,07	2,47	0,2	4,7	4,17
21-mai	2,93	3,17	2,49	1,6	4,3	3,85
22-mai	2,71	3,67	2,52	0,2	3,9	3,35
23-mai	3,60	3,24	3,30	0	4,2	4,21
31-mai	2,64	3,14	2,21	5	3,5	4,01
1-jun	3,23	3,33	2,60	2,8	4,2	3,99
11-jun	2,94	3,39	2,74	0,4	4,2	3,33
16-jun	2,94	3,02	2,69	0	3,5	3,75
18-jun	2,97	3,48	2,87	0	4,3	3,48
23-jun	1,90	2,48	1,29	0	2,9	3,10
24-jun	3,04	3,56	2,82	0	3,9	3,41
25-jun	3,17	3,90	2,95	0	4,5	3,80
26-jun	2,06	2,31	2,82	3,9	2,7	2,97
29-jun	1,88	2,21	0,95	3,3	3,2	3,14
30-jun	2,53	2,90	2,59	0	2,9	3,46
1-jul	2,70	3,16	2,51	1	4,1	3,37
7-jul	1,72	2,01	1,56	1,4	2,3	3,27
9-jul	1,74	1,94	1,62	3,6	2,1	2,67
16-jul	1,60	1,87	1,64	0	3,1	3,64
17-jul	1,84	2,10	1,71	2,4	2,7	2,80
20-jul	2,53	3,15	3,40	2,2	3,7	2,66
24-jul	3,62	4,24	3,37	0	4,9	4,18

27-jul	1,98	2,22	2,13	1,7	3,0	3,16
28-jul	2,75	3,84	2,56	1,2	3,9	3,05
2-ago	2,75	3,19	2,38	0,5	4,9	3,41
3-ago	3,12	3,05	2,11	0	4,3	3,55
4-ago	1,99	2,33	1,83	1,2	2,7	3,05
5-ago	3,49	3,28	2,56	1	5,0	3,70
6-ago	2,31	2,74	2,14	0,2	3,3	3,70
7-ago	2,28	2,77	2,12	0,6	2,9	2,88
8-ago	3,04	3,27	2,89	1,6	4,6	3,66
11-ago	2,54	3,01	2,54	0,4	3,3	3,53

Dias	ETO Penman- Monteith- FAO.	ETO Sensor	ETO Manometro	Precipitação	ECA	Eto Hargreaves
12-ago	3,37	2,71	3,11	0,2	3,7	3,69
16-ago	3,03	2,22	2,57	0,6	4,0	3,67
17-ago	3,18	3,32	2,49	1	4,1	3,52
23-ago	2,55	2,98	2,37	0,2	3,7	3,74
24-ago	2,81	3,10	2,52	1,6	4,4	4,05
25-ago	3,31	3,81	2,97	0,2	4,7	3,76
26-ago	2,47	3,47	2,43	0,2	3,3	3,41
28-ago	2,81	3,29	2,61	0	3,0	4,51
29-ago	2,11	2,53	1,57	0	2,0	3,38
1-set	1,29	1,51	1,20	3	1,8	3,27
6-set	2,39	2,69	2,22	0,4	3,2	4,10
7-set	3,31	4,25	3,20	7	4,0	3,72
15-set	2,29	2,49	2,80	1,4	4,0	3,77
16-set	3,33	3,32	3,18	5	4,8	3,64
17-set	3,29	4,02	3,21	0	4,0	3,64
18-set	2,52	2,96	1,23	2,4	3,8	3,42
19-set	2,54	3,02	2,42	0	3,3	3,10
20-set	3,20	3,75	3,10	0	3,8	4,61
21-set	3,26	3,62	3,03	0	4,4	3,59
22-set	2,33	2,78	2,16	2,2	3,8	3,43
23-set	2,94	3,30	2,57	3,3	3,9	3,63
24-set	3,82	4,12	3,21	0	5,5	4,20
25-set	2,12	2,48	2,02	0	2,9	3,76
26-set	3,20	3,41	2,66	0	4,4	4,31
27-set	3,04	3,35	2,95	0	3,4	4,77
28-set	2,53	2,96	2,41	0,8	3,9	3,81
29-set	2,79	2,70	2,73	0	3,7	3,94
30-set	3,41	4,00	3,17	5	5,2	3,90
2-out	2,38	3,85	2,35	0,4	3,4	4,23
3-out	3,24	3,86	3,01	3,5	4,2	3,94
4-out	3,47	4,08	3,14	0	5,5	4,46
5-out	2,02	2,59	2,02	0,5	3,5	3,73

6-out	3,85	5,37	3,76	0	4,4	5,55
7-out	3,04	2,76	2,36	0	4,5	3,94
8-out	3,03	3,54	2,81	0	4,0	3,65
10-out	2,82	3,11	2,90	0	4,8	4,10
11-out	2,89	3,49	2,80	0,4	4,8	4,13
13-out	2,56	3,25	2,30	0,2	3,4	4,92
14-out	3,40	3,98	3,30	3,2	4,9	4,08
18-out	3,10	3,88	2,88	0	4,4	3,94
19-out	2,93	3,44	2,73	0,2	4,0	5,51
20-out	3,45	4,23	3,30	0	5,1	4,63
ETO						
Dias	Penman-Monteith-FAO.	ETO Sensor	ETO Manometro	Precipitação	ECA	Eto Hargreaves
21-out	3,29	3,32	3,02	2	5,3	3,95
22-out	3,52	4,32	3,60	0	5,7	4,72
23-out	3,63	3,89	3,29	0	4,8	4,04
26-out	2,83	3,94	2,74	0,8	4,4	4,07
28-out	1,62	1,88	1,50	1	2,6	3,63
29-out	2,24	2,64	2,18	0	3,0	4,01
30-out	2,49	2,92	2,20	1,2	3,6	3,83
31-out	3,15	3,83	3,10	0	5,1	3,97
1-nov	3,68	4,52	3,32	0	5,4	4,46
6-nov	2,37	2,42	2,21	0	2,4	4,37
7-nov	3,26	3,67	3,20	1,2	4,2	3,85
8-nov	2,75	2,64	3,63	0	3,8	3,57
9-nov	3,28	2,20	3,17	0	4,8	3,20
10-nov	3,74	4,28	3,60	1	5,1	3,89
11-nov	2,55	2,99	2,50	0	4,3	4,09
12-nov	3,09	3,94	3,85	0	5,3	4,68
13-nov	2,90	3,39	2,80	0	4,2	4,14
14-nov	2,78	3,36	4,65	0,8	5,0	4,00
15-nov	3,30	3,83	2,98	0	5,1	4,03
16-nov	3,60	4,21	3,35	0	4,1	4,08
17-nov	2,79	3,52	2,53	0	3,8	3,39
18-nov	3,78	4,74	3,35	2,6	3,2	4,17
19-nov	3,52	3,90	3,54	0	5,4	3,54
20-nov	2,79	3,26	3,91	0	4,5	4,13
22-nov	2,72	2,09	1,87	0,4	3,9	5,17
23-nov	2,11	2,70	1,96	0	2,8	3,70
24-nov	2,01	2,20	1,70	0,8	4,0	5,14
25-nov	2,71	2,63	2,62	0	3,5	4,15
26-nov	3,24	3,87	3,02	0	5,7	3,94
27-nov	3,51	4,11	3,26	0	5,1	4,01
28-nov	2,57	3,33	2,50	0	3,4	3,97
29-nov	2,34	2,74	2,17	0	3,5	3,89

30-nov	2,20	2,81	2,05	2	3,3	4,88
1-dez	2,72	3,18	2,52	4	3,8	4,05
2-dez	3,20	3,75	3,15	2	4,8	3,99
3-dez	2,67	3,25	2,60	0	3,6	4,23
4-dez	3,57	3,44	3,32	0	5,0	4,83
5-dez	3,23	3,78	3,15	0	5,5	4,37
6-dez	3,10	3,43	3,02	0	4,4	4,21
7-dez	2,87	3,36	2,82	0	4,0	5,48
8-dez	3,10	3,12	2,89	0	4,6	4,42
9-dez	3,23	3,58	3,15	0	4,3	4,22

Dias	ETO Penman- Monteith- FAO.	ETO Sensor	ETO Manometro	Precipitação	ECA	Eto Hargreaves
10-dez	2,85	3,34	2,56	0	4,5	4,58
11-dez	3,63	4,06	3,38	0	5,0	4,10
12-dez	3,27	3,63	3,20	0	5,6	4,22
13-dez	3,10	3,63	3,02	0	4,4	4,29
14-dez	3,40	3,44	3,30	0	4,5	4,73
15-dez	2,50	3,14	2,45	0	3,3	4,36
16-dez	3,05	3,67	3,02	0	4,8	4,34
17-dez	3,18	3,73	3,18	0	5,5	4,29
18-dez	1,34	1,47	1,25	2	1,9	3,66
23-dez	2,00	2,07	1,64	3,6	2,6	4,91
24-dez	2,92	2,72	2,80	1	4,0	3,96
25-dez	2,77	3,46	2,70	0	4,4	4,24
26-dez	3,41	4,14	3,39	0	4,8	4,00
27-dez	2,73	2,74	2,34	0	4,9	3,29
28-dez	2,56	3,00	2,30	0	4,0	3,94
29-dez	3,21	4,14	2,90	0	5,5	5,11
30-dez	3,24	3,44	3,02	0	3,9	4,15
1-jan	3,40	4,19	3,07	0	5,3	4,44
2-jan	3,45	4,04	3,21	0	4,2	4,27
3-jan	3,35	3,93	3,12	0	4,8	4,81
4-jan	3,66	4,28	3,50	0	4,8	5,30
5-jan	2,91	3,51	2,71	0	3,7	4,94
8-jan	3,44	4,14	3,20	0	4,2	4,51
9-jan	2,95	3,36	2,74	1	4,2	4,19
11-jan	3,34	3,91	3,10	0	4,8	4,87
16-jan	3,67	4,30	5,61	0	6,2	4,75
17-jan	3,31	2,91	2,27	0	5,8	5,53
19-jan	2,64	3,09	2,03	2	3,4	3,97
20-jan	3,01	3,52	2,80	0	3,9	4,65
21-jan	2,99	3,06	2,78	0	5,2	4,66
22-jan	3,08	3,61	2,86	0	3,7	4,76
23-jan	3,75	4,19	3,48	2,6	4,7	4,63

24-jan	3,24	3,79	3,14	0	4,6	4,87
25-jan	2,98	2,74	1,68	0	4,7	4,39
26-jan	1,99	2,40	3,16	8	2,9	3,67
28-jan	2,68	3,13	2,49	0	2,7	4,13
29-jan	3,74	2,96	1,35	0,6	4,1	4,01
31-jan	2,69	3,20	2,50	0	4,4	4,36
1-fev	3,23	3,78	3,00	0	4,2	4,13
2-fev	3,84	3,60	1,25	6	4,5	4,54
4-fev	1,96	2,29	1,82	0,8	2,8	3,61
5-fev	3,21	2,24	2,99	0	5,0	5,44

Dias	ETO			Precipitação	ECA	Eto Hargreaves
	Penman-Monteith-FAO.	ETO Sensor	ETO Manometro			
6-fev	3,67	3,30	2,28	9	5,2	5,44
12-fev	3,35	3,58	3,12	0,2	3,7	4,67
13-fev	1,49	1,74	1,38	3	2,1	3,58
16-fev	2,39	3,97	2,22	0	4,3	5,58
17-fev	3,55	3,38	3,30	0	4,1	5,87
18-fev	3,27	3,83	3,04	0	4,1	4,95
19-fev	3,57	3,76	3,27	0	3,9	4,45
23-fev	2,57	3,11	2,39	0,6	3,4	4,05
24-fev	1,89	2,22	2,35	0	2,6	3,04
25-fev	2,09	2,50	1,95	0	3,6	4,38
26-fev	3,63	4,63	3,38	0	4,8	4,33
27-fev	2,96	2,93	2,75	0	4,1	3,83
28-fev	3,67	4,28	3,41	0	4,0	3,43

**APÊNDICE B – DADOS MÉDIOS DIÁRIOS DE VELOCIDADE DO VENTO,
UMIDADE RELATIVA MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA, ÁREA DE BORDADURA E
TEMPERATURA MÁXIMA DO AR**

Dias	Velocidade do vento m s⁻¹	Umidade Relativa Min (%)	Umidade Relativa Máx, (%)	Umidade Relativa média (%)	Bordadura (metros)	Temperatura Máxima
9-mar	0,676	61,23	90,5	75,87	10	30,61
10-mar	0,677	59,16	90,8	74,98	10	32,09
12-mar	0,721	56,06	91,5	73,78	10	33,21
13-mar	0,664	50,41	92,9	71,66	10	34,14
16-mar	0,634	56,55	90,6	73,58	10	32,63
17-mar	0,679	59,5	88,9	74,20	10	33,54
21-mar	0,441	60,68	92	76,34	10	33,89
22-mar	0,483	58,97	92,5	75,74	10	34,07
23-mar	0,581	54,96	92,2	73,58	10	33,95
24-mar	0,231	55,06	92,5	73,78	10	33,48
25-mar	0,363	55,95	91,1	73,53	10	34,07
26-mar	0,632	56,53	91,1	73,82	10	33,78
27-mar	0,653	55,31	89,8	72,56	10	34,35
28-mar	0,737	48,67	88,9	68,79	10	34,35
29-mar	0,68	52,68	91,6	72,14	10	34,60
30-mar	0,912	53,93	90,3	72,12	10	33,38
31-mar	0,834	53,83	87,6	70,72	10	33,36
1-abr	0,915	50,53	87,3	68,92	10	34,00
4-abr	0,722	48,27	93,1	70,69	10	33,47
5-abr	0,703	55,09	90,5	72,80	10	33,81
6-abr	0,485	51,98	91,2	71,59	10	34,00
7-abr	0,378	59,38	91,6	75,49	10	34,34
8-abr	0,638	55,49	92,6	74,05	10	34,46
9-abr	0,728	53,76	92,8	73,28	10	34,07
10-abr	0,67	55,53	88	71,77	10	33,37
11-abr	0,223	61	92,2	76,60	10	33,69
12-abr	0,782	62,61	92,6	77,61	10	34,11
13-abr	0,864	53	91,6	72,30	10	33,19
14-abr	0,449	63,11	91,7	77,41	10	33,39
15-abr	0,61	59,08	92,6	75,84	10	32,30

16-abr	0,603	55,13	92,1	73,62	10	34,20
17-abr	0,542	50,58	92,7	71,64	10	32,80
18-abr	0,71	52,74	92,4	72,57	10	35,24
26-abr	0,446	54,58	93,2	73,89	10	33,17
27-abr	0,837	60,46	91,8	76,13	10	31,75
3-mai	0,558	59,82	93,5	76,66	10	32,72
4-mai	0,653	56,9	93,1	75,00	10	32,06
5-mai	1,169	54,04	92,6	73,32	10	32,47
Dias	Velocidade do vento m s ⁻¹	Umidade Relativa Min (%)	Umidade Relativa Máx, (%)	Umidade Relativa média (%)	Bordadura (metros)	Temperatura Máxima
6-mai	0,938	58,9	91,3	75,10	10	31,10
7-mai	0,404	55,79	91,7	73,75	10	32,71
8-mai	0,436	60,38	93	76,69	10	33,53
9-mai	0,535	58,9	92,3	75,60	10	32,43
13-mai	1.252	58,48	91,41	74,94	10	30,50
15-mai	1.252	58,18	91,44	74,81	10	30,26
20-mai	0,611	58,38	93,3	75,84	10	32,17
21-mai	0,701	62,97	93,4	78,19	10	32,21
22-mai	0,484	65,24	92,1	78,67	10	31,70
23-mai	0,505	58,54	93,3	75,92	10	32,36
31-mai	0,339	60,9	92,9	76,90	10	32,26
1-jun	0,452	52,18	92,9	72,54	10	31,85
11-jun	0,341	61,84	93,3	77,57	10	31,32
16-jun	0,552	64,1	93,6	78,85	10	31,82
18-jun	0,369	58,5	93,4	75,95	10	32,31
23-jun	0,491	65,52	93,4	79,46	10	31,25
24-jun	0,653	56,32	93,2	74,76	10	31,44
25-jun	0,565	54,55	93,5	74,03	10	30,74
26-jun	0,507	66,16	93,8	79,98	10	31,00
29-jun	0,228	71,11	92,8	81,96	10	30,23
30-jun	0,477	62,23	92,9	77,57	10	31,20
1-jul	0,678	56,21	93,9	75,06	10	30,57
7-jul	0,508	68,09	92,3	80,20	10	30,96
9-jul	0,035	70,35	93,2	81,78	10	30,02
16-jul	0,484	51,82	93,2	72,51	10	30,34
17-jul	0,463	60,77	93,4	77,09	10	28,84
20-jul	0,515	63,08	93,1	78,09	10	29,10
24-jul	0,632	43,75	92,1	67,93	10	32,46
27-jul	0,314	60,97	93,2	77,09	10	29,87
28-jul	0,7	57,12	93,6	75,36	10	30,26
2-ago	0,601	58,96	92,5	75,73	10	29,96
3-ago	0,998	53,52	88,8	71,16	10	30,24
4-ago	0,564	57,53	91,3	74,42	10	29,29
5-ago	0,505	51,48	92,9	72,19	10	30,91
6-ago	0,596	63,62	93,2	78,41	10	31,29

7-ago	0,918	60,55	85,1	72,83	10	29,60
8-ago	0,813	47,54	90,8	69,17	10	30,80
11-ago	0,92	58,55	88,2	73,38	10	29,61
12-ago	0,635	55,59	92,3	73,95	10	30,71
16-ago	0,494	57,51	93,1	75,31	10	30,02
17-ago	0,665	55,8	93,3	74,55	10	31,35
23-ago	0,749	58,86	92,5	75,68	10	30,90
24-ago	0,838	56,29	90,8	73,55	10	31,73
Dias	Velocidade do vento m s ⁻¹	Umidade Relativa Min (%)	Umidade Relativa Máx, (%)	Umidade Relativa média (%)	Bordadura (metros)	Temperatura Máxima
25-ago	0,905	57,93	88,1	73,02	10	30,70
26-ago	1.176	60,54	88,6	74,57	10	30,73
28-ago	0,83	59,11	91	75,06	10	31,31
29-ago	0,619	63,43	92,5	77,97	10	30,10
1-set	1.023	67,41	86,9	77,16	10	30,13
6-set	0,601	60,74	91,7	76,22	10	31,18
7-set	0,776	56,5	91,8	74,15	10	31,38
15-set	0,872	66,21	90,7	78,46	10	30,81
16-set	0,758	58,58	89,7	74,14	10	30,99
17-set	0,58	56,31	90,1	73,21	10	30,73
18-set	0,504	55,65	91,8	73,73	10	29,96
19-set	0,927	62,73	92,7	77,72	10	29,42
20-set	1.265	55,06	83,5	69,28	10	31,38
21-set	1.357	54,39	88,2	71,30	10	30,07
22-set	0,711	63,47	91,8	77,64	10	30,15
23-set	0,529	60,18	92,7	76,44	10	29,90
24-set	0,807	53,96	91,5	72,73	10	30,63
25-set	0,539	58,63	91,4	75,02	10	30,32
26-set	0,524	55,41	92	73,71	10	31,11
27-set	0,611	52,2	92,4	72,30	10	32,52
28-set	0,652	59,8	90,6	75,20	10	30,21
29-set	0,798	59,2	91,8	75,50	10	31,42
30-set	0,832	52,68	87,2	69,94	10	30,69
2-out	0,576	55,77	91,7	73,74	10	31,82
3-out	0,633	53,82	91,8	72,81	10	30,17
4-out	0,77	54,37	91,8	73,09	10	31,76
5-out	0,485	60,78	90,4	75,59	10	30,83
6-out	0,54	53,47	91,7	72,59	10	33,84
7-out	0,663	54,43	92	73,22	10	31,12
8-out	0,976	56,67	85,5	71,09	10	30,30
10-out	0,935	59,46	90,8	75,13	10	31,90
11-out	1	56,72	87,7	72,21	10	31,01
13-out	0,736	58,54	92,4	75,47	10	32,61
14-out	0,825	55,75	89,9	72,83	10	30,82
18-out	0,681	56,78	91	73,89	10	31,16

19-out	0,815	57,25	88,9	73,08	10	33,38
20-out	0,746	48,91	92,1	70,51	10	31,84
21-out	0,845	53,89	92,1	73,00	10	31,28
22-out	1.126	50,06	85,4	67,73	10	32,78
23-out	1.002	50,65	84,1	67,38	10	31,31
26-out	0,742	56,55	90,9	73,73	10	30,84
28-out	0,459	56,96	92,1	74,53	10	30,25
29-out	1,026	61,35	92,2	76,78	10	31,48
Dias	Velocidade do vento m s ⁻¹	Umidade Relativa Min (%)	Umidade Relativa Máx, (%)	Umidade Relativa média (%)	Bordadura (metros)	Temperatura Máxima
30-out	0,774	50,93	90,7	70,82	10	30,81
31-out	0,842	55,38	91,9	73,64	10	31,14
1-nov	0,867	47,07	89,7	68,39	10	32,08
6-nov	0,862	61,67	88,9	75,29	10	31,14
7-nov	0,906	53,34	92,4	72,87	10	30,77
8-nov	0,856	52,33	89,3	70,82	10	30,51
9-nov	0,853	53,57	90,3	71,94	10	30,31
10-nov	1,06	51,83	83,8	67,82	10	30,98
11-nov	1.112	55,87	88,6	72,24	10	31,14
12-nov	0,892	52,09	90,9	71,50	10	32,84
13-nov	1.037	50,41	85,1	67,76	10	31,75
14-nov	1.065	51,09	84,9	68,00	10	31,11
15-nov	1.078	49,32	89,1	69,21	10	31,42
16-nov	1.156	46,76	76,37	61,57	10	31,12
17-nov	0,985	52,44	83,8	68,12	10	29,99
18-nov	0,776	56,55	90,2	73,38	10	31,49
19-nov	1.002	55,61	90	72,81	10	30,10
20-nov	1,3	55,8	82,4	69,10	10	31,60
22-nov	0,635	60,88	93	76,94	10	32,79
23-nov	0,612	59,47	92,1	75,79	10	30,52
24-nov	0,841	60,41	91,7	76,06	10	32,93
25-nov	0,762	59,24	91,8	75,52	10	31,29
26-nov	0,911	53,97	89	71,49	10	30,77
27-nov	0,792	52,58	91,3	71,94	10	30,43
28-nov	0,992	52,83	89,3	71,07	10	30,26
29-nov	0,938	57	91,2	74,10	10	30,56
30-nov	0,866	56,89	89	72,95	10	33,47
1-dez	0,939	50,8	87,4	69,10	10	31,68
2-dez	0,781	58,32	89,4	73,86	10	31,16
3-dez	0,648	58,39	91,7	75,05	10	31,86
4-dez	0,637	54,52	92,2	73,36	10	32,91
5-dez	0,884	53,29	92,9	73,10	10	31,80
6-dez	1.078	52,72	91,9	72,31	10	31,54
7-dez	1.002	55,5	92,2	73,85	10	34,26
8-dez	0,956	54,65	91,8	73,23	10	31,84

9-dez	0,948	54,71	91,1	72,91	10	31,04
10-dez	0,912	52,02	88,2	70,11	10	32,16
11-dez	0,839	45,27	88,6	66,94	10	31,23
12-dez	0,996	47,6	90,8	69,20	10	31,75
13-dez	1,619	54,63	92,1	73,37	10	32,30
14-dez	1,396	52,02	91	71,51	10	31,98
15-dez	0,971	54,08	92,4	73,24	10	31,98
16-dez	1,017	50,81	92,2	71,51	10	32,39
Dias	Velocidade do vento m s ⁻¹	Umidade Relativa Min (%)	Umidade Relativa Máx, (%)	Umidade Relativa média (%)	Bordadura (metros)	Temperatura Máxima
17-dez	1.137	47,14	91,2	69,17	10	32,44
18-dez	1.205	61,4	88,2	74,80	10	30,62
23-dez	0,83	63,59	91,5	77,55	10	33,18
24-dez	0,787	58,01	91,9	74,96	10	31,49
25-dez	0,731	55,25	86,6	70,93	10	31,89
26-dez	0,78	57,63	89,6	73,62	10	30,95
27-dez	0,753	59,2	89,6	74,40	10	30,65
28-dez	1.004	61,78	84,2	72,99	10	31,40
29-dez	0,908	57	84,4	70,70	10	33,43
30-dez	0,774	52,17	90,8	71,49	10	31,82
1-jan	0,722	51,88	92,4	72,14	10	33,25
2-jan	1.081	55,58	82,4	68,99	10	31,57
3-jan	0,907	48,89	91,2	70,05	10	33,24
4-jan	0,867	40,62	85,7	63,16	10	34,05
5-jan	0,78	54,19	90,4	72,30	10	32,24
8-jan	0,948	49,5	86,9	68,20	10	32,67
9-jan	0,551	52,03	91,6	71,82	10	29,49
11-jan	0,725	57,01	93,4	75,21	10	32,95
16-jan	0,84	51,66	91,1	71,38	10	32,39
17-jan	0,649	53,86	91,3	72,58	10	34,07
19-jan	0,864	60,28	91,1	75,69	10	32,09
20-jan	0,921	55,04	88,2	71,62	10	32,96
21-jan	0,969	50,21	90,4	70,31	10	32,32
22-jan	0,788	52,32	92,4	72,36	10	33,63
23-jan	0,882	47,15	83,9	65,53	10	32,66
24-jan	0,886	56,73	91,6	74,17	10	32,84
25-jan	0,967	51,88	89,7	70,79	10	31,79
26-jan	0,486	61,33	91,3	76,32	10	30,74
28-jan	1.024	62,51	92,4	77,46	10	31,82
29-jan	0,982	45,5	83,8	64,65	10	30,99
31-jan	1.197	57,8	85,3	71,55	10	31,68
1-fev	1.041	54,98	86,6	70,79	10	31,75
2-fev	0,863	52,04	89,8	70,92	10	32,00
4-fev	0,641	61,01	92,6	76,81	10	30,75
5-fev	0,542	52,41	92,6	72,51	10	33,86

6-fev	0,729	49,52	90,6	70,06	10	33,91
12-fev	0,733	52,92	92	72,46	10	31,97
13-fev	0,651	62,41	90,3	76,36	10	30,39
16-fev	0,651	57,96	91,3	74,63	10	34,61
17-fev	0,701	50,93	90,9	70,92	10	34,89
18-fev	0,639	52,34	93,2	72,77	10	33,92
19-fev	0,427	50,23	93,1	71,67	10	31,77
23-fev	0,523	54,57	92,9	73,74	10	31,06
Dias	Velocidade do vento m s⁻¹	Umidade Relativa Min (%)	Umidade Relativa Máx, (%)	Umidade Relativa média (%)	Bordadura (metros)	Temperatura Máxima
24-fev	0,44	59,22	92,4	75,81	10	30,06
25-fev	0,677	57,94	93,9	75,92	10	31,75
26-fev	0,527	51,57	93,2	72,39	10	31,64
27-fev	0,593	56,6	92,6	74,60	10	31,04
28-fev	0,639	44,08	94,1	69,09	10	30,25

**APÊNDICE C – DADOS MÉDIOS DIÁRIOS DE TEMPERATURA MÍNIMA,
DISTÂNCIA RELATIVA DA TERRA AO SOL, LATITUDE, ÂNGULO DA HORA
POR SOL E RADIAÇÃO SOLAR EXTRA TERRESTRE**

Dias	Temperatura Mínima	dr	Latitude graus (-)	δ (radianos)	ângulo da hora do por do sol ws (radianos)	Radiação solar extra terrestre Ra (MJ M ⁻² dia ⁻¹)
9-mar	27,48	1,01	(-) 8,05°	-0,095	1,58	38,32
10-mar	26,61	1,01		-0,088	1,58	38,27
12-mar	25,98	1,01		-0,074	1,58	38,15
13-mar	27,53	1,01		-0,067	1,58	38,09
16-mar	27,16	1,01		-0,047	1,58	37,90
17-mar	25,09	1,01		-0,040	1,58	37,84
21-mar	23,39	1,01		-0,011	1,57	37,54
22-mar	23,57	1,01		-0,004	1,57	37,47
23-mar	24,40	1,01		0,003	1,57	37,39
24-mar	24,17	1,00		0,010	1,57	37,31
25-mar	23,77	1,00		0,017	1,57	37,22
26-mar	24,85	1,00		0,024	1,57	37,14
27-mar	24,64	1,00		0,031	1,57	37,05
28-mar	23,85	1,00		0,038	1,57	36,97
29-mar	24,75	1,00		0,045	1,56	36,88
30-mar	24,61	1,00		0,052	1,56	36,78
31-mar	25,03	1,00		0,059	1,56	36,69
1-abr	23,97	1,00		0,066	1,56	36,60
4-abr	24,94	1,00		0,087	1,56	36,31
5-abr	23,72	1,00		0,093	1,56	36,21
6-abr	24,05	1,00		0,100	1,56	36,11
7-abr	23,47	1,00		0,107	1,56	36,00
8-abr	23,03	1,00		0,114	1,55	35,90
9-abr	25,35	1,00		0,121	1,55	35,80
10-abr	23,23	1,00		0,127	1,55	35,69
11-abr	24,50	0,99		0,134	1,55	35,59
12-abr	25,54	0,99		0,141	1,55	35,48
13-abr	24,25	0,99		0,147	1,55	35,37
14-abr	25,98	0,99		0,154	1,55	35,26
15-abr	25,18	0,99		0,160	1,55	35,15
16-abr	22,59	0,99		0,167	1,55	35,04
17-abr	23,91	0,99		0,173	1,55	34,93

18-abr	25,34	0,99		0,180	1,55	34,82
26-abr	25,07	0,99		0,228	1,54	33,93
27-abr	24,67	0,99		0,234	1,54	33,82
3-mai	25,74	0,98		0,268	1,53	33,15
4-mai	22,23	0,98		0,273	1,53	33,05
Dias	Temperatura Mínima	dr	Latitude graus (-)	δ (radianos)	ângulo da hora do por do sol ws (radianos)	Radiação solar extra terrestre Ra (MJ M ⁻² dia ⁻¹)
5-mai	23,93	0,98		0,278	1,53	32,94
6-mai	25,33	0,98		0,283	1,53	32,83
7-mai	24,08	0,98		0,288	1,53	32,73
8-mai	24,22	0,98		0,293	1,53	32,62
9-mai	24,26	0,98		0,298	1,53	32,52
13-mai	26,20	0,98		0,317	1,52	32,12
15-mai	25,73	0,98		0,325	1,52	31,92
20-mai	22,36	0,98		0,346	1,52	31,47
21-mai	24,13	0,98		0,349	1,52	31,38
22-mai	25,68	0,97		0,353	1,52	31,30
23-mai	22,20	0,97		0,356	1,52	31,22
31-mai	22,79	0,97		0,381	1,51	30,64
1-jun	22,22	0,97		0,383	1,51	30,58
11-jun	24,68	0,97		0,402	1,51	30,11
16-jun	23,14	0,97		0,407	1,51	29,98
18-jun	25,26	0,97		0,408	1,51	29,94
23-jun	25,54	0,97		0,409	1,51	29,91
24-jun	24,39	0,97		0,409	1,51	29,91
25-jun	21,16	0,97		0,409	1,51	29,91
26-jun	25,74	0,97		0,408	1,51	29,92
29-jun	24,05	0,97		0,406	1,51	29,96
30-jun	23,84	0,97		0,405	1,51	29,98
1-jul	23,42	0,97		0,404	1,51	30,00
7-jul	24,54	0,97		0,395	1,51	30,19
9-jul	25,79	0,97		0,392	1,51	30,28
16-jul	22,07	0,97		0,374	1,52	30,65
17-jul	24,02	0,97		0,372	1,52	30,72
20-jul	24,93	0,97		0,362	1,52	30,92
24-jul	22,55	0,97		0,348	1,52	31,22
27-jul	24,15	0,97		0,337	1,52	31,47
28-jul	25,15	0,97		0,333	1,52	31,55
2-ago	23,47	0,97		0,311	1,53	32,01
3-ago	23,22	0,97		0,306	1,53	32,10
4-ago	24,14	0,97		0,302	1,53	32,20
5-ago	23,54	0,97		0,297	1,53	32,30
6-ago	24,14	0,97		0,292	1,53	32,40
7-ago	25,24	0,97		0,287	1,53	32,49

8-ago	23,75	0,97		0,282	1,53	32,60
11-ago	22,86	0,97		0,266	1,53	32,90
12-ago	23,72	0,98		0,261	1,53	33,01
16-ago	23,04	0,98		0,238	1,54	33,43
17-ago	25,48	0,98		0,233	1,54	33,54
Dias	Temperatura Mínima	dr	Latitude graus (-)	δ (radianos)	ângulo da hora do por do sol ws (radianos)	Radiação solar extra terrestre Ra (MJ M ⁻² dia ⁻¹)
23-ago	24,31	0,98		0,197	1,54	34,18
24-ago	24,17	0,98		0,190	1,54	34,29
25-ago	24,07	0,98		0,184	1,54	34,40
26-ago	25,48	0,98		0,178	1,55	34,51
28-ago	21,49	0,98		0,165	1,55	34,72
29-ago	24,90	0,98		0,159	1,55	34,83
1-set	25,38	0,98		0,139	1,55	35,14
6-set	23,87	0,99		0,105	1,56	35,65
7-set	25,65	0,99		0,099	1,56	35,75
15-set	25,00	0,99		0,043	1,56	36,50
16-set	25,72	0,99		0,036	1,57	36,59
17-set	25,41	0,99		0,029	1,57	36,67
18-set	25,18	0,99		0,022	1,57	36,76
19-set	25,49	0,99		0,015	1,57	36,84
20-set	22,55	0,99		0,008	1,57	36,92
21-set	24,84	0,99		0,001	1,57	37,00
22-set	25,49	1,00		-0,006	1,57	37,08
23-set	24,57	1,00		-0,013	1,57	37,16
24-set	23,44	1,00		-0,020	1,57	37,23
25-set	24,71	1,00		-0,027	1,57	37,31
26-set	23,73	1,00		-0,034	1,58	37,38
27-set	23,81	1,00		-0,041	1,58	37,45
28-set	24,47	1,00		-0,048	1,58	37,51
29-set	25,61	1,00		-0,055	1,58	37,58
30-set	24,82	1,00		-0,062	1,58	37,64
2-out	25,18	1,00		-0,076	1,58	37,77
3-out	24,05	1,00		-0,083	1,58	37,82
4-out	24,26	1,00		-0,090	1,58	37,88
5-out	25,65	1,00		-0,097	1,58	37,94
6-out	22,33	1,00		-0,104	1,59	37,99
7-out	25,37	1,00		-0,111	1,59	38,04
8-out	25,28	1,00		-0,117	1,59	38,09
10-out	25,89	1,01		-0,131	1,59	38,18
11-out	24,64	1,01		-0,137	1,59	38,22
13-out	23,76	1,01		-0,151	1,59	38,31
14-out	24,60	1,01		-0,157	1,59	38,34
18-out	25,58	1,01		-0,183	1,60	38,48

19-out	22,21	1,01		-0,189	1,60	38,51
20-out	24,01	1,01		-0,195	1,60	38,54
21-out	25,73	1,01		-0,201	1,60	38,56
22-out	25	1,01		-0,207	1,60	38,59
23-out	25,5	1,01		-0,214	1,60	38,61
Dias	Temperatura Mínima	dr	Latitude graus (-)	δ (radianos)	ângulo da hora do por do sol ws (radianos)	Radiação solar extra terrestre Ra (MJ M ⁻² dia ⁻¹)
26-out	24,8	1,01		-0,231	1,60	38,67
28-out	25,45	1,01		-0,243	1,61	38,70
29-out	25,83	1,02		-0,248	1,61	38,72
30-out	25,57	1,02		-0,254	1,61	38,73
31-out	25,55	1,02		-0,259	1,61	38,74
1-nov	25,08	1,02		-0,265	1,61	38,75
6-nov	24,18	1,02		-0,291	1,61	38,79
7-nov	25,48	1,02		-0,296	1,61	38,79
8-nov	25,97	1,02		-0,300	1,61	38,80
9-nov	26,71	1,02		-0,305	1,62	38,80
10-nov	25,62	1,02		-0,310	1,62	38,80
11-nov	25,17	1,02		-0,314	1,62	38,80
12-nov	25,32	1,02		-0,319	1,62	38,80
13-nov	25,79	1,02		-0,323	1,62	38,80
14-nov	25,41	1,02		-0,327	1,62	38,80
15-nov	25,73	1,02		-0,332	1,62	38,80
16-nov	25,18	1,02		-0,336	1,62	38,80
17-nov	25,85	1,02		-0,340	1,62	38,80
18-nov	25,34	1,02		-0,344	1,62	38,79
19-nov	25,55	1,02		-0,347	1,62	38,79
20-nov	25,61	1,03		-0,351	1,62	38,79
22-nov	23,15	1,03		-0,358	1,62	38,78
23-nov	25,59	1,03		-0,361	1,62	38,77
24-nov	23,49	1,03		-0,365	1,62	38,77
25-nov	25,14	1,03		-0,368	1,63	38,76
26-nov	25,17	1,03		-0,371	1,63	38,76
27-nov	24,51	1,03		-0,374	1,63	38,76
28-nov	24,41	1,03		-0,377	1,63	38,75
29-nov	25,07	1,03		-0,379	1,63	38,75
30-nov	25,39	1,03		-0,382	1,63	38,74
1-dez	25,96	1,03		-0,384	1,63	38,74
2-dez	25,51	1,03		-0,387	1,63	38,73
3-dez	25,62	1,03		-0,389	1,63	38,73
4-dez	24,78	1,03		-0,391	1,63	38,73
5-dez	25,02	1,03		-0,393	1,63	38,72
6-dez	25,24	1,03		-0,395	1,63	38,72
7-dez	23,93	1,03		-0,397	1,63	38,72

8-dez	24,88	1,03		-0,399	1,63	38,71
9-dez	24,54	1,03		-0,400	1,63	38,71
10-dez	24,73	1,03		-0,401	1,63	38,71
11-dez	25,20	1,03		-0,403	1,63	38,71
12-dez	25,47	1,03		-0,404	1,63	38,71
Dias	Temperatura Mínima	dr	Latitude graus (-)	δ (radianos)	ângulo da hora do por do sol ws (radianos)	Radiação solar extra terrestre Ra (MJ M ⁻² dia ⁻¹)
13-dez	25,98	1,03		-0,405	1,63	38,70
14-dez	23,88	1,03		-0,406	1,63	38,70
15-dez	25,31	1,03		-0,407	1,63	38,70
16-dez	25,92	1,03		-0,408	1,63	38,70
17-dez	26,14	1,03		-0,408	1,63	38,71
18-dez	25,82	1,03		-0,409	1,63	38,71
23-dez	24,86	1,03		-0,409	1,63	38,72
24-dez	26,02	1,03		-0,409	1,63	38,73
25-dez	25,62	1,03		-0,409	1,63	38,73
26-dez	25,20	1,03		-0,408	1,63	38,74
27-dez	26,87	1,03		-0,407	1,63	38,74
28-dez	25,98	1,03		-0,407	1,63	38,75
29-dez	24,38	1,03		-0,406	1,63	38,76
30-dez	25,84	1,03		-0,405	1,63	38,77
1-jan	26,72	1,03		-0,402	1,63	38,78
2-jan	25,11	1,03		-0,401	1,63	38,79
3-jan	25,37	1,03		-0,400	1,63	38,80
4-jan	24,50	1,03		-0,398	1,63	38,81
5-jan	23,39	1,03		-0,396	1,63	38,82
8-jan	25,73	1,03		-0,391	1,63	38,85
9-jan	22,63	1,03		-0,388	1,63	38,86
11-jan	24,76	1,03		-0,384	1,63	38,88
16-jan	24,49	1,03		-0,370	1,63	38,94
17-jan	23,55	1,03		-0,367	1,63	38,95
19-jan	26,82	1,03		-0,361	1,62	38,97
20-jan	25,67	1,03		-0,357	1,62	38,98
21-jan	24,75	1,03		-0,354	1,62	38,99
22-jan	26,21	1,03		-0,350	1,62	39,00
23-jan	25,37	1,03		-0,346	1,62	39,01
24-jan	24,70	1,03		-0,343	1,62	39,02
25-jan	25,08	1,03		-0,339	1,62	39,03
26-jan	26,03	1,03		-0,335	1,62	39,04
28-jan	25,99	1,03		-0,326	1,62	39,05
29-jan	25,32	1,03		-0,322	1,62	39,06
31-jan	25,05	1,03		-0,313	1,62	39,07
1-fev	25,91	1,03		-0,309	1,62	39,07
2-fev	24,84	1,03		-0,304	1,62	39,08

4-fev	26,22	1,03		-0,299	1,61	39,08
5-fev	23,72	1,03		-0,289	1,61	39,08
6-fev	23,81	1,03		-0,284	1,61	39,08
12-fev	24,28	1,02		-0,252	1,61	39,05
13-fev	25,85	1,02		-0,247	1,61	39,04
Dias	Temperatura Mínima	dr	Latitude graus (-)	δ (radianos)	ângulo da hora do por do sol ws (radianos)	Radiação solar extra terrestre Ra (MJ M⁻² dia⁻¹)
16-fev	24,20	1,02		-0,230	1,60	39,01
17-fev	23,13	1,02		-0,224	1,60	38,99
18-fev	25,85	1,02		-0,218	1,60	38,98
19-fev	24,78	1,02		-0,212	1,60	38,96
23-fev	25,23	1,02		-0,187	1,60	38,87
24-fev	26,81	1,02		-0,181	1,60	38,84
25-fev	24,97	1,02		-0,175	1,60	38,81
26-fev	24,98	1,02		-0,168	1,59	38,78
27-fev	25,86	1,02		-0,162	1,59	38,75
28-fev	26,02	1,02		-0,155	1,59	38,72