**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-
manso (*Jatropha curcas* L.)**

Danilton Luiz Flumignan

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2011**

Danilton Luiz Flumignan
Engenheiro Agrônomo

Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.)

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2011**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Flumignan, Danilton Luiz

Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-mansô
(*Jatropha curcas* L.) / Danilton Luiz Flumignan. - - Piracicaba, 2011.
200 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Balanço hídrico 2. Coeficiente de cultivo 3. Evapotranspiração 4. Irrigação
5. Pinhão mansô I. Título

CDD 633.85
F646L

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais Ermelindo e Sonia;

Aos meus irmãos Danilo e Daniel;

A minha namorada Patricia;

A todos os amigos e familiares;

*Aqueles que trabalham em prol da ciência e desta
máquina de produção agrícola chamada Brasil.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Marcos Vinícius Folegatti, pessoa a qual tenho enorme admiração. Agradeço pela amizade, pela confiança em mim depositada, pela oportunidade de realizar o doutorado, por conceder-me ótimas condições de trabalho e pelos inúmeros ensinamentos transmitidos. Dentre os ensinamentos, espero ter aprendido pelo menos um pouco da sua grande capacidade de gerir equipes, o que não é tarefa fácil!

Agradeço também aos demais professores do Depto. de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP. Seja pelas aulas ou pelo convívio, o aprendizado durante o doutorado foi muito grande e deveu-se, em grande parte, a vocês.

Às secretárias do Depto. de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, Bia, Sandra e Davi. Em especial, gostaria de agradecer a Bia, pois sempre esteve presente durante a realização desta tese e é, sem dúvida, a melhor secretária que já conheci!

Aos técnicos e funcionários do Depto. de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP. Em especial, ao Afonso, pois sempre esteve presente e prestativo durante a realização desta tese, ao Miranda, pela ajuda na escavação com a retroescavadeira e, ao Gilmar, pelo apoio nas análises do solo em laboratório.

À ESALQ pela oportunidade de realização do doutorado, pelo ótimo ambiente e pelas excelentes condições de estudo. Aprendi a amar esta instituição!

À FAPESP pela concessão da bolsa de doutorado, bem como pelo financiamento do projeto de pesquisa, o qual também fora financiado pelo CNPq e que também agradeço.

Agradeço ao professor Dr. Roberto Terumi Atarassi da UFU, pela ajuda no planejamento inicial dos lisímetros, na análise dos dados e na revisão do texto da tese. Também agradeço ao pesquisador Dr. Carlos Ricardo Fietz da Embrapa Agropecuária Oeste, pela ajuda na revisão do texto da tese.

À Secretaria Municipal de Agricultura e Abastecimento de Piracicaba-SP, pela gentileza em emprestar o caminhão prancha e funcionários para o transporte dos tanques dos lisímetros.

Agradeço aos meus pais, Ermelindo e Sonia, por terem sido a base de tudo desde o começo, ensinando os princípios mais básicos da vida e por terem me induzido a seguir o

caminho mais correto, o dos estudos. Agradeço também aos meus irmãos, Danilo e Daniel, e aos demais familiares, por sempre estarem presente em minha vida e pelo amor que sentem por mim.

À minha namorada Patricia, pessoa tão especial, que soube assimilar muito bem essa fase difícil de namoro à distância durante quatro longos anos. Agradeço pela motivação que me deu quando me faltaram forças, pelo amor que sente por mim e pela grande amizade que sempre se fez presente no nosso relacionamento.

Gostaria de agradecer também a todos os amigos, em especial, aqueles do “corredor”, pelo convívio tão amigo e pelas inúmeras vezes em que colaboraram para a realização desta tese. Assim, agradeço aos amigos Janaína, Cícero, Basalto, Cornélio, Bruno, Till, Kubano, Ronaldo, Jussálvia, Lígia e João. Principalmente, gostaria de agradecer ao Kubano, Janaína, Cícero, Bruno, Till, Ronaldo e Cornélio. Sem vocês, a conclusão desta tese, provavelmente, não teria sido uma realidade! Muito obrigado de coração! Agradeço também ao meu grande amigo e companheiro desde os tempos de graduação, Nóia. Agradeço pelo ótimo convívio no tempo em que dividimos a república e que também ajudou na realização desta tese.

Enfim, acredito que a família, namorada e amigos se reflete naquilo que fazemos e, desta forma, se essa tese de doutorado se concretizou, foi porque vocês tiveram participação nela!

Também acredito que o que fazemos no presente é fruto do que vivenciamos no passado. Portanto, agradeço duas grandes instituições as quais tive a honra de estudar ou estagiar, UEL e IAPAR. Em especial agradeço ao amigo, professor e pesquisador Dr. Rogério Teixeira de Faria, por ter me apresentado às áreas de irrigação e agrometeorologia e por ter me ensinado tanto sobre estas.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
RESUMEN	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	23
1 INTRODUÇÃO	25
2 DESENVOLVIMENTO	31
2.1 Revisão bibliográfica.....	31
2.1.1 Pinhão-manso.....	31
2.1.1.1 A planta	31
2.1.1.2 Produtividade potencial e teor de óleo	40
2.1.1.3 Exigências edafoclimáticas	41
2.1.1.4 Consumo hídrico	46
2.1.2 Evapotranspiração.....	47
2.1.2.1 Definição	47
2.1.2.2 Evaporação	47
2.1.2.3 Transpiração	48
2.1.2.4 Fatores que afetam a evapotranspiração.....	49
2.1.2.4.1 Fatores climáticos.....	49
2.1.2.4.2 Fatores relacionados ao cultivo	49
2.1.2.4.3 Fatores relacionados ao manejo e às condições ambientais.....	50
2.1.2.5 Conceitos de evapotranspiração	51
2.1.2.5.1 Evapotranspiração de referência (ET_0)	51
2.1.2.5.2 Evapotranspiração do cultivo sob condição padrão (ET_c)	54
2.1.2.5.3 Evapotranspiração do cultivo sob condição não padrão ($ET_{c_{aj}}$).....	54
2.1.2.6 O coeficiente de cultivo (K_c).....	55
2.1.2.7 Importância e uso da evapotranspiração	56
2.1.3 Lisimetria de pesagem no estudo da evapotranspiração	57
2.1.3.1 Histórico da lisimetria	57
2.1.3.2 Definição	58
2.1.3.3 Tipos de lisímetros	58
2.1.3.4 Balanço hídrico no lisímetro de pesagem	60
2.1.3.5 Calibração	61

2.1.3.6	Problemas operacionais	62
2.2	Material e métodos	63
2.2.1	Caracterização da área experimental	63
2.2.2	Planejamento inicial dos lisímetros	65
2.2.2.1	Escolha da metodologia	65
2.2.2.2	Locação dos lisímetros e o tamanho da área experimental	66
2.2.2.3	Formato e dimensões dos lisímetros	67
2.2.2.4	Número de repetições	68
2.2.3	Construção dos lisímetros	68
2.2.3.1	Escavação e nivelamento	68
2.2.3.2	Alvenaria	70
2.2.3.3	Construção, transporte e instalação dos tanques lisimétricos	75
2.2.3.4	Sistema de drenagem	78
2.2.3.5	Sistema de aquisição de dados e sua programação	80
2.2.3.6	Sistema de pesagem e cálculos preliminares	81
2.2.3.7	Reconstrução do solo	88
2.2.4	Avaliação do solo original	90
2.2.4.1	Amostragem	90
2.2.4.2	Curva de retenção	93
2.2.4.3	Densidade do solo	96
2.2.5	Avaliação do solo reconstruído	96
2.2.6	Teste das células de carga em laboratório	97
2.2.7	Calibração dos lisímetros	97
2.2.8	Teste de sensibilidade à temperatura	102
2.2.9	Teste de sensibilidade ao vento	103
2.3	Resultados e discussões	105
2.3.1	Avaliação da reconstrução do solo	105
2.3.2	Tempo de construção, dificuldades encontradas e custos	109
2.3.3	Avaliação das células de carga em laboratório	113
2.3.4	Calibração dos lisímetros	118
2.3.4.1	Lisímetros do tratamento irrigado por pivô central	118
2.3.4.2	Lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento	126
2.3.4.3	Lisímetros do tratamento sem irrigação	132
2.3.4.3.1	Identificação do problema do lisímetro ALFA [®]	139

2.3.4.4	Interpretação dos resultados das calibrações.....	144
2.3.5	Avaliação da influência da temperatura nos lisímetros	149
2.3.5.1	Influência da abertura da porta do fosso de acesso nos lisímetros.....	149
2.3.5.2	Lisímetros do tratamento irrigado por pivô central.....	152
2.3.5.3	Lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento.....	156
2.3.5.4	Lisímetros do tratamento sem irrigação	160
2.3.6	Avaliação da influência do vento nos lisímetros	163
2.3.6.1	Lisímetros do tratamento irrigado por pivô central.....	163
2.3.6.2	Lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento.....	169
2.3.6.3	Lisímetros do tratamento sem irrigação	174
2.3.7	Melhorias recomendadas para os lisímetros	178
3	CONCLUSÕES.....	179
	REFERÊNCIAS	181
	ANEXOS.....	191

RESUMO

Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)

Nos últimos anos tem aumentado o interesse no uso do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) como fonte de óleo para a produção de biodiesel. No entanto, o conhecimento atualmente disponível sobre o consumo hídrico desta cultura é escasso e constitui um dos principais fatores limitantes no seu uso como alternativa agroenergética. Somado a isso, acredita-se que o aumento da produção de biodiesel no mundo irá aumentar a pressão sobre os recursos hídricos, o que torna necessário utilizar a água na agricultura da forma mais eficiente possível. Assim, este estudo teve como objetivo construir seis lisímetros de pesagem direta que serão utilizados para estudar o consumo hídrico do pinhão-manso irrigado por pivô central, gotejamento e sem irrigação. Esses lisímetros foram calibrados e testados quanto a sua sensibilidade a temperatura do ar e vento. Além disso, comparou-se a influência do uso de duas células de carga diferentes na qualidade dos mesmos. Na área de cada tratamento foram instalados dois lisímetros, sendo um utilizando células de carga ALFA® e outro HBM®. Cada lisímetro foi constituído por tanques de aço carbono de 1,955 m de raio interno (12 m²) e 1,3 m de profundidade útil. Estes foram circundados por paredes de concreto, possuíam sistema de drenagem e se encontravam diretamente apoiados sobre três células de carga. Ambos os modelos das células apresentavam capacidade nominal de 10.000 kg, sendo a capacidade combinada do lisímetro de 30.000 kg. Os lisímetros foram calibrados adicionando e, depois, retirando 1.000 kg de massa dos mesmos. Os dados foram usados para ajustar um modelo de regressão linear entre a massa acumulada e a média do sinal de saída das três células de carga. No teste de sensibilidade à temperatura, a massa dos lisímetros foi monitorada por até dois dias consecutivos, sob condição de massa constante e com proteção para não haver interferência do vento. Os dados foram comparados com a temperatura registrada na estação meteorológica e, também, com a temperatura medida pelo *datalogger* e um termohigrômetro, os quais foram instalados no fosso dos lisímetros. Para a avaliação da sensibilidade ao vento, foram construídos protótipos de árvores usando tubos de PVC e lonas de ráfia. Em cada lisímetro instalou-se uma árvore e, sob condição de massa constante, a massa dos mesmos foi monitorada por seis dias consecutivos. Os dados obtidos foram comparados com a velocidade do vento medida na estação meteorológica. Todos os lisímetros construídos neste estudo apresentaram qualidade suficiente para serem usados na determinação da evapotranspiração em escala horária e diária. Nos lisímetros ALFA®, a resolução final das medidas foi de 0,0013 mm, sendo realizadas com boa precisão, apresentando histerese e baixa acurácia (erro padrão entre 0,27 e 1,04 mm). Os lisímetros HBM® apresentaram resolução final de 0,00088 mm, boa precisão, pouca ou nenhuma histerese e alta acurácia (erro padrão entre 0,03 e 0,1 mm). Todos os lisímetros demonstraram não sofrer influência da temperatura e do vento na determinação da evapotranspiração, embora, em ambos, ALFA® e HBM®, a precisão das medidas foi reduzida linearmente com o aumento da velocidade do vento.

Palavras-chave: Evapotranspiração; Coeficiente de cultivo; Irrigação; Requerimento hídrico

ABSTRACT

Direct weighing lysimeters to study the crop water use by physic nut (*Jatropha curcas* L.)

Recently, there is an increasing interest in using physic nut (*Jatropha curcas* L.) as a source of oil for biodiesel production. However, currently knowledge regarding its crop water requirement is scarce and constitutes one of the main gaps that limit its use as an agroenergy alternative. In addition, there is a general agreement that an increase in biodiesel production worldwide will bring additional pressure to water resources, what provokes to use water in agriculture in a more efficient way. So, this study had as objective to construct six direct weighing lysimeter that will be used to study the water use of physic nut conducted under sprinkler and drip irrigation, and without irrigation. These lysimeters were calibrated and tested for its sensibility to air temperature and wind. Furthermore, there was also compared the influence of using two different load cells on their quality. Two lysimeters were installed for each treatment, one using ALFA[®] load cells and other using HBM[®]. Each lysimeter was constituted by a steel tank with 1.955 m inner radius (12 m²) and 1.3 m of usable depth. They were encompassed by concrete walls, have a drainage system and were directly supported by three load cells. Both load cell models has a nominal capacity of 10,000 kg, with a lysimeter summed capacity of 30,000 kg. Lysimeters calibration procedure was done by adding and, after it, removing 1,000 kg of mass from then. Data were used to fit a linear regression model between the accumulated mass and the mean output value of the three load cells. For testing the sensibility to temperature, lysimeters mass were monitored till two consecutive days, under constant mass and with a barrier for protecting against wind interference. Data were compared to the temperature measured by the weather station and, also, by that measured by a datalogger and a thermohygrometer, which were installed inside the lysimeters pit. For testing to wind sensibility, there were constructed some trees prototypes using PVC pipes and raffia tarpaulin. One tree was installed on each lysimeter and, under constant mass, lysimeters mass were monitored during six consecutive days. Data were compared to the wind velocity, as measured by the weather station. All the six lysimeters constructed in this study presented adequate quality to be used for the determination of evapotranspiration on hourly and daily basis. For ALFA[®] lysimeters, the final measurement resolution was 0.0013 mm, being obtained with good precision, hysteresis, and low accuracy (standard error of 0.27 to 1.04 mm). HBM[®] lysimeters presented a final resolution of 0.00088 mm, good precision, few or no hysteresis, and high accuracy (standard error between 0.03 and 0.1 mm). All lysimeters proved to be not influenced by air temperature and wind on the determination of evapotranspiration, in spite of, in both, ALFA[®] and HBM[®] lysimeters, their measurement precision was linearly reduced with an increase in wind velocity.

Keywords: Evapotranspiration; Crop coefficient; Irrigation; Water requirement

RESUMEN

Lisímetros de pesada directa para el estudio del consumo hídrico del piñón manso (*Jatropha curcas* L.)

En los últimos años ha aumentado el interés en utilizar el piñón manso (*Jatropha curcas* L.) como fuente de aceite para la producción de biodiesel. Sin embargo, el conocimiento actualmente disponible acerca del consumo hídrico de este cultivo es escaso y eso se constituye en uno de los principales factores que todavía limitan su uso como alternativa agroenergética. Además, hay un consentimiento de que el aumento de la producción de biodiesel por todo el mundo aumentará la presión sobre los recursos hídricos, hecho que hace con que el uso del agua en la agricultura sea realizado de la manera más eficiente posible. Así, este estudio tuvo como objetivo construir seis lisímetros de pesada directa que serán utilizados para estudiar el consumo hídrico del piñón manso regado por pivot central, goteo y conducido sin riego. Estos lisímetros fueran calibrados y testados cuanto a su sensibilidad a la temperatura del aire y el viento. Además, ha sido comparada la influencia del uso de dos células de pesaje distintas en la calidad de los lisímetros. En el área destinada a cada tratamiento han sido instalados dos lisímetros, uno con células de pesaje ALFA® y el otro con HBM®. Cada lisímetro ha sido hecho con tanques de acero de 1,955 m de radio interno (12 m²) y 1,3 m de profundidad útil. Estos fueran circundados por paredes de concreto, poseían sistema de drenaje y se encontraban apoyados directamente sobre tres células de pesaje. Ambos los modelos de las células presentaban capacidad nominal de 10.000 kg y, así, la capacidad total del lisímetro era de 30.000 kg. Los lisímetros fueran calibrados adicionando y, después, quitando 1.000 kg de masa de los mismos. Los datos fueran utilizados para ajustar un modelo de regresión lineal entre la masa acumulada y la media de la señal de salida de las tres células de pesaje. En el test de sensibilidad a la temperatura, la masa de los lisímetros ha sido monitoreada por hasta dos días consecutivos, bajo condición de masa constante y con protección para no haber interferencia del viento. Los datos fueran comparados con la temperatura determinada en la estación meteorológica y, también, con la temperatura medida por el *datalogger* y por un termohigrómetro, los cuales han sido instalados en el foso de los lisímetros. Para evaluar la sensibilidad de los lisímetros al viento, se han construidos prototipos de árboles utilizando tuberías de PVC y lonas de rafia. En cada lisímetro se ha instalado un árbol y, bajo condición de masa constante, la masa de los lisímetros ha sido monitoreada por seis días consecutivos. Los datos han sido comparados con la velocidad del viento medida en la estación meteorológica. Todos los lisímetros construidos en este estudio presentaran calidad suficiente para utilización en la determinación de la evapotranspiración horaria y diaria. En los lisímetros ALFA®, la resolución final de medición fue de 0,0013 mm, siendo las medidas obtenidas con buena precisión, presentando histerésis y baja exactitud (error padrón entre 0,27 y 1,04 mm). Los lisímetros HBM® presentaran resolución final de 0,00088 mm, buena precisión, poca o ninguna histerésis y alta exactitud (error padrón entre 0,03 y 0,1 mm). Todos los lisímetros demostraran que no son influenciados por la temperatura y el viento en la determinación de la evapotranspiración, aunque, en ambos, ALFA® y HBM®, la precisión de las medidas ha sido reducida linealmente con el aumento en la velocidad del viento.

Palabras clave: Evapotranspiración; Coeficiente del cultivo; Riego; Requerimiento de agua

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Plantas de pinhão-manso em Charqueada-SP com 1 ano e 10 meses de idade durante a estação chuvosa (A), aos 4 anos durante a estação chuvosa (B), aos 4 anos e 6 meses durante a estação seca (C) e padrão de crescimento simpodial da mandioca (*Manihot esculenta* L. Crantz), a qual também pertence a família *Euphorbiaceae* (D)..... 33
- Figura 2 – Detalhe do tronco (A), ramo com as cicatrizes decorrentes da abscisão foliar (B) e exsudação de látex ocorrendo em ramo (C) e troncos de plantas jovens (D)..... 34
- Figura 3 – Limbo de folhas pequenas de pinhão-manso normalmente encontradas em mudas (A) e folha grande de pinhão-manso (B)..... 35
- Figura 4 – Inflorescência do pinhão-manso (A) e as flores masculina (B) e feminina (C)..... 36
- Figura 5 – Frutos de pinhão-manso em diferentes graus de maturação (A) e escala de avaliação da maturação de frutos (B) proposta por Dranski et al. (2010)..... 36
- Figura 6 – Sementes de pinhão-manso 37
- Figura 7 – Sistema radicular do pinhão-manso na fase de plântula (A) e planta adulta (B) 38
- Figura 8 – Sistema radicular do pinhão-manso propagado por estaquia..... 39
- Figura 9 – Produtividade potencial do pinhão-manso cultivado sem irrigação (A) e com irrigação (B) para as diferentes regiões brasileiras 41
- Figura 10 – Mapa da área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas localizada na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) 64
- Figura 11 – Início da escavação manual do solo para a construção dos lisímetros (A) e fosso já escavado e camadas de solo sendo reservadas durante a escavação (B) 69
- Figura 12 – Retroescavadeira aumentando a profundidade do fosso dos lisímetros para próximo de 3 m (A) e momento da abertura do fosso para a porta de acesso e o túnel de interligação dos lisímetros (B)..... 69
- Figura 13 – Fosso totalmente aberto e nivelado para construção dos lisímetros de um tratamento 70
- Figura 14 – Etapas da construção da alvenaria dos lisímetros. Marcação dos pontos da construção (A), construção da primeira fileira de blocos (B), sapata para coluna de sustentação, auxiliar e de união (C, D e E), primeira fileira de blocos e sapatas já construídas (F), fase

intermediária da construção com as paredes parcialmente levantadas e sendo construída a laje do túnel de interligação, bem como as colunas de sustentação, auxiliar e de união (G), vista externa do fosso de acesso e das cintas de concreto (H e I), vista interna da construção (J), disposição do seixo no fundo (K) e vista dos lisímetros após a sua construção completa (L).....	74
Figura 15 – Vista lateral do tanque lisimétrico (A e B), fundo cônico já construído (C) e vista interna com detalhe do exutório (D)	76
Figura 16 – Caminhão munck (A) e caminhão prancha (B) utilizados para o transporte dos tanques lisimétricos e momento do transporte sendo realizado na ponte sobre o Rio Piracicaba (C).....	77
Figura 17 – Momento da instalação do tanque do lisímetro, sendo os parafusos de suporte colocados na rosca da chapa de apoio (A), retoque da pintura (B), alinhamento e descida do tanque usando o caminhão munck (C) e vista do tanque completamente baixado e alinhado com as colunas de sustentação da alvenaria (D)	78
Figura 18 – Sistema de drenagem dos lisímetros.....	79
Figura 19 – Vista lateral e superior da célula de carga e seu suporte da marca ALFA [®] (A e B, respectivamente) e HBM [®] (C e D, respectivamente).....	82
Figura 20 – Elevação do tanque lisimétrico para a instalação da célula de carga (A), recolhimento dos parafusos para dentro da rosca (B) e posicionamento da célula de carga e momento da descida do tanque (C).....	83
Figura 21 – Etapas da reconstrução do solo nos lisímetros, sendo o exutório coberto com bidim (A), todo o fundo cônico preenchido com seixo (B), bidim para separar o seixo do solo a ser reconstruído (C), marcas realizadas nos tanques para delimitar as camadas a serem reconstruídas (detalhe C) e tanque com solo reconstruído da camada de 60-130 cm (D), 40-60 cm (E), 20-40 cm (F) e 0-20 cm (G).....	90
Figura 22 – Materiais utilizados para a coleta das amostras de solo para a determinação da sua densidade e a elaboração da curva de retenção (A), momento da abertura da trincheira (B), disposição dos anéis de Kopeck para a coleta (C), amostra coletada e sendo embrulhada em papel alumínio para ser conduzida ao laboratório (D) e amostras já preparadas em laboratório (E)	92

Figura 23 – Mesas de tensão (A) e câmaras de Richards (B) utilizadas na elaboração da curva de retenção.....	94
Figura 24 – Coleta das amostras para determinação da densidade do solo após a sua reconstrução	97
Figura 25 – Confeção das massas padrão de 2 kg (A), 10 kg (B) e diferentes massas padrão preparadas para a calibração (C).....	99
Figura 26 – Abertura dos buracos para instalação dos mourões (A), vista dos mourões e fios de arame já instalados (B), barreira de lona construída com a porta de acesso aberta (C) e vista superior do lisímetro protegido pela barreira de lona com a porta de acesso fechada (D).....	100
Figura 27 – Momento da calibração do lisímetro do tratamento irrigado por gotejamento e que utiliza célula de carga ALFA [®]	101
Figura 28 – Vista lateral do projeto do protótipo da árvore de pinhão-mansô (A), vista inclinada superior (B), protótipo já construído (C) e instalado nos lisímetros (D).....	104
Figura 29 – Densidade e barras de desvio padrão do solo original e reconstruído nos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] , os quais foram determinados nas áreas dos tratamentos irrigado por pivô central (A), gotejamento (B) e sem irrigação (C).....	108
Figura 30 – Precipitação ocorrida em Piracicaba-SP entre os dias 01/10/2010 e 30/04/2011	110
Figura 31 – Vista do fosso (A) e vista externa (B) do desmoronamento das paredes dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento, ocasionado pelo excesso de chuvas ocorrido durante a fase de construção da alvenaria.....	111
Figura 32 – Caminhão munck sendo rebocado por trator para instalação dos tanques lisimétricos	112
Figura 33 – Massa determinada em laboratório pelas células de carga ALFA [®] (A) e HBM [®] (B), acompanhada da temperatura determinada pelo <i>datalogger</i> (Temp CR1000), durante quatro dias consecutivos sem nenhuma carga atuando sobre as células	115
Figura 34 – Desvio padrão da massa determinada em laboratório pelas células de carga ALFA [®] (A) e HBM [®] (B) durante quatro dias consecutivos sem nenhuma carga atuando sobre as mesmas	117
Figura 35 – Ajuste das equações de calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central utilizando células de carga ALFA [®] (A) e HBM [®] (B).....	120

Figura 36 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento irrigado por pivô central durante a calibração	122
Figura 37 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central	123
Figura 38 – Desvio padrão das massas determinadas nos lisímetros ALFA [®] (A) e HBM [®] (B) do tratamento irrigado por pivô central em função da massa acumulada sobre os mesmos durante a calibração.....	125
Figura 39 – Ajuste das equações de calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento utilizando células de carga ALFA [®] (A) e HBM [®] (B)	128
Figura 40 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento irrigado por gotejamento durante a calibração.....	129
Figura 41 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento.....	130
Figura 42 – Desvio padrão das massas determinadas nos lisímetros ALFA [®] (A) e HBM [®] (B) do tratamento irrigado por gotejamento em função da massa acumulada sobre os mesmos durante a calibração.....	131
Figura 43 – Ajuste das equações de calibração dos lisímetros do tratamento sem irrigação utilizando células de carga ALFA [®] (A) e HBM [®] (B)	134
Figura 44 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento sem irrigação durante a calibração	136
Figura 45 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração dos lisímetros do tratamento sem irrigação.....	137
Figura 46 – Desvio padrão das massas determinadas nos lisímetros ALFA [®] (A) e HBM [®] (B) do tratamento sem irrigação em função da massa acumulada sobre os mesmos durante a calibração	138
Figura 47 – Desvio padrão da massa relacionada às três células de carga durante a calibração do lisímetro ALFA [®] do tratamento sem irrigação	140
Figura 48 – Massa (A) e histerese (B) relativa a cada célula de carga durante a calibração do lisímetro ALFA [®] do tratamento sem irrigação	141
Figura 49 – Ajuste da equação de calibração do lisímetro ALFA [®] do tratamento sem irrigação considerando-se o comportamento ideal da célula de carga nº 3	142

- Figura 50 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelo lisímetro ALFA[®] do tratamento sem irrigação durante a calibração, utilizando-se os dados originais (ALFA) e os corrigidos simulando-se o comportamento ideal da célula nº 3 (ALFA corrigida)..... 143
- Figura 51 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração do lisímetro ALFA[®] do tratamento sem irrigação, utilizando-se os dados originais (ALFA) e os corrigidos simulando-se o comportamento ideal da célula nº 3 (ALFA corrigida)..... 144
- Figura 52 – Temperatura no fosso monitorada pelo termohigrômetro e a massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) do tratamento irrigado por pivô central durante o teste de influência da temperatura nos lisímetros 150
- Figura 53 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) do tratamento irrigado por pivô central durante o teste de influência da temperatura nos lisímetros..... 151
- Figura 54 – Massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) comparada com as temperaturas determinadas na estação meteorológica (Temp Est), pelo termohigrômetro no fosso dos lisímetros (Temp Fosso) e pelo *datalogger* (Temp CR1000) durante um dia para a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central 154
- Figura 55 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por pivô central na evapotranspiração horária (A) e diária (B) 155
- Figura 56 – Massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) comparada com as temperaturas determinadas na estação meteorológica (Temp Est), pelo termohigrômetro no fosso dos lisímetros (Temp Fosso) e pelo *datalogger* (Temp CR1000) durante dois dias consecutivos para a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento..... 157
- Figura 57 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por gotejamento na evapotranspiração horária (A) e diária (B) 159
- Figura 58 – Massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) comparada com as temperaturas determinadas na estação meteorológica (Temp Est), pelo termohigrômetro no fosso dos lisímetros (Temp Fosso) e pelo *datalogger* (Temp CR1000) durante um dia para a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento sem irrigação 161

Figura 59 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento sem irrigação na evapotranspiração horária (A) e diária (B)	162
Figura 60 – Massa dos lisímetros ALFA [®] (A) e HBM [®] (B) comparada com a velocidade média do vento durante um seis dias consecutivos para a avaliação da sua influência nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central	165
Figura 61 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento irrigado por pivô central durante o teste de influência do vento	166
Figura 62 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento irrigado por pivô central na evapotranspiração horária (A) e diária (B)	168
Figura 63 – Massa dos lisímetros ALFA [®] (A) e HBM [®] (B) comparada com a velocidade média do vento durante um seis dias consecutivos para a avaliação da sua influência nos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento	170
Figura 64 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento irrigado por gotejamento durante o teste de influência do vento	171
Figura 65 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento irrigado por gotejamento na evapotranspiração horária (A) e diária (B)	173
Figura 66 – Massa dos lisímetros ALFA [®] (A) e HBM [®] (B) comparada com a velocidade média do vento durante um seis dias consecutivos para a avaliação da sua influência nos lisímetros do tratamento sem irrigação	175
Figura 67 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento sem irrigação durante o teste de influência do vento	176
Figura 68 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA [®] e HBM [®] do tratamento sem irrigação na evapotranspiração horária (A) e diária (B)	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores da constante do numerador (C_n) e constante do denominador (C_d) para utilização na eq. (1) em função do tempo de análise da evapotranspiração de referência (ET_o) e da radiação líquida horária (R_n)	53
Tabela 2 – Especificações técnicas das células de carga.....	84
Tabela 3 – Precipitação total mensal e número de dias com e sem chuva em Piracicaba-SP no período entre 01/10/2010 e 30/04/2011	110
Tabela 4 – Custo de construção, calibração e teste dos seis lisímetros de pesagem direta	113
Tabela 5 – Resultados do teste das células de carga ALFA [®] e HBM [®] realizado em laboratório	116
Tabela 6 – Condições ambientais durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central, sendo T_{CR1000} a temperatura do <i>datalogger</i> (°C), T_{fosso} a temperatura medida no fosso dos lisímetros (°C), T_{ar} a temperatura do ar externo medida na estação meteorológica (°C), UR_{ar} a umidade relativa do ar externo (%), v a velocidade média do vento ($m\ s^{-1}$) e Q_g a radiação solar global ($W\ m^{-2}$)	119
Tabela 7 – Condições ambientais durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento, sendo T_{CR1000} a temperatura do <i>datalogger</i> (°C), T_{fosso} a temperatura medida no fosso dos lisímetros (°C), T_{ar} a temperatura do ar externo medida na estação meteorológica (°C), UR_{ar} a umidade relativa do ar externo (%), v a velocidade média do vento ($m\ s^{-1}$) e Q_g a radiação solar global ($W\ m^{-2}$)	126
Tabela 8 – Condições ambientais durante a calibração dos lisímetros do tratamento sem irrigação, sendo T_{CR1000} a temperatura do <i>datalogger</i> (°C), T_{fosso} a temperatura medida no fosso dos lisímetros (°C), T_{ar} a temperatura do ar externo medida na estação meteorológica (°C), UR_{ar} a umidade relativa do ar externo (%), v a velocidade média do vento ($m\ s^{-1}$) e Q_g a radiação solar global ($W\ m^{-2}$)	132
Tabela 9 – Resultados da calibração dos lisímetros, sendo R^2 o coeficiente de determinação (adimensional), b o coeficiente angular ($kg\ (mV\ V^{-1})^{-1}$), a o intercepto (kg), Res a resolução final do lisímetro na determinação da evapotranspiração (mm), ε o erro padrão da estimativa do modelo de regressão (mm), H a média da histerese (kg) e DP a média do desvio padrão (kg)	145

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o mundo encontra-se em uma fase de mudança da matriz energética, onde fontes mais limpas e renováveis de energia são cada vez mais utilizadas, objetivando-se reduzir os impactos ambientais e devido ao caráter finito das reservas de petróleo.

No Brasil, a produção de óleos vegetais visando à geração de energia (biodiesel) ainda é incipiente. Porém, em função de fatores como a vasta extensão territorial e a grande diversidade de climas, solos e espécies oleaginosas, o cenário futuro para o país é bastante promissor.

Dentre as diferentes oleaginosas, o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) tem se destacado como uma das potenciais alternativa para o fornecimento de matéria prima para a produção de biodiesel no mundo. Conforme demonstra Renner (2007), diversos especialistas e empresas do ramo acreditam que o pinhão-manso será a próxima grande fonte de biocombustível.

No Brasil, a mesma tem sido estimulada como uma boa alternativa para as regiões do semi-árido nordestino e do cerrado. No entanto, segundo Beltrão et al. (2006), o pinhão-manso ainda é uma espécie não domesticada e o conhecimento técnico/científico atualmente disponível sobre a mesma é bastante reduzido. Segundo estes autores, esses fatores ainda inibem o seu uso como alternativa agroenergética no país.

Embora exista um grande potencial no Brasil para a exploração do pinhão-manso, China e Índia têm liderado as ações no que se refere à cultura no mundo. Conforme dados de fevereiro de 2007, a China apresentava cerca de 2 milhões de ha cultivados e planos para plantio de mais 11 milhões de ha até 2010. A Índia, que em outubro de 2007 apresentava entre 500 e 600 mil ha cultivados, planejava aumentar sua área plantada para valores próximos de 12 milhões de ha (FAIRLESS, 2007).

Achten et al. (2008) apontam que o interesse e a produção de biodiesel a partir do óleo de pinhão-manso têm experimentado uma rápida expansão no mundo todo. Segundo estes autores, isso se deve ao fato de que o óleo produzido pode ser facilmente convertido em biodiesel líquido, o qual possui especificações que atendem aos padrões exigidos pelos mercados dos Estados Unidos e Europa. Além disso, a torta resultante da prensa pode ser utilizada como fertilizante e o resíduo orgânico pode ser submetido à digestão para produção de biogás (CH₄).

Outras características têm impulsionado a popularização do pinhão-mansão, entre elas o fato de ser uma planta não comestível, logo seu produto comercial é utilizado prioritariamente para fins energéticos. Ainda, referências têm sido feitas com relação ao bom desempenho da cultura no aproveitamento e recuperação de áreas degradadas. Por fim, a planta é considerada exigente em insolação e tolerante a seca e a baixa fertilidade dos solos. Segundo muitos autores, essas características conferem ao pinhão-mansão aptidão para cultivo em regiões tropicais e subtropicais, sob condições áridas e semi-áridas. Assim, acredita-se que o seu cultivo pode não competir com a produção de alimentos, pois este pode ser cultivado em áreas consideradas marginais a muitas culturas alimentícias (OPENSHAW, 2000; ARRUDA et al., 2004; ACHTEN et al., 2008; KUMAR; SHARMA, 2008).

Embora exista a necessidade iminente do uso do biodiesel como fonte de energia alternativa ao combustível fóssil, Berndes (2002), Fraiture, Giordano e Liao (2008) e Phalan (2009) chamam a atenção para o fato de que o aumento na produção de biodiesel certamente irá aumentar a pressão pelo uso da água no mundo.

Este cenário futuro poderá ser ainda mais frágil, pois existe outro fator agravante que também irá aumentar a pressão pelo uso da água: a irrigação. Essa constatação se justifica devido ao fato de que para suprir as necessidades dos 8 bilhões de habitantes esperados na terra em 2025, a área irrigada deverá ser ampliada em mais de 20% e a produtividade das culturas irrigadas deverá aumentar em 40%, se comparado aos níveis atuais (LASCANO; SOJKA, 2007).

Para Johnson, Revenga e Echeverria (2001), comparado aos setores doméstico e industrial, a agricultura apresenta um impacto desproporcionalmente mais elevado na vazão, na qualidade da água e na alteração dos habitats aquáticos naturais. Segundo estes autores, por meio da irrigação, a agricultura é responsável pela retirada de, aproximadamente, 70% de toda água doce no mundo. Mesmo assim, Bos et al. (2009) salientam a importância que a irrigação exerce atualmente na sociedade mundial, pois a mesma é utilizada em, aproximadamente, 16% das áreas cultivadas e produz em torno de 40% de toda a fibra e alimento.

Logo, embora impactante, é notório que a irrigação é uma prática vital para a sociedade mundial atual e será ainda mais importante no futuro. Portanto, a sociedade encontra-se diante de uma transição bastante tênue, onde de um lado é preciso aumentar a produção de biodiesel e, do outro, tanto nos cultivos sem irrigação, quanto nos irrigados, é preciso otimizar o

aproveitamento dos recursos hídricos, minimizando os impactos provocados nos mesmos. Para isso, é de suma importância conhecer o consumo hídrico dos cultivos, pois esta informação é fundamental para diversas aplicações, como por exemplo, na irrigação, em estudos de zoneamento agrícola e definição das melhores épocas de semeadura, previsão de safras e em estudos hidrológicos em geral.

Conforme Heller (1996), Francis, Edinger e Becker (2005) e Achten et al. (2008), apesar de acreditar-se que o pinhão-manso seja uma planta tolerante a seca, essa característica ainda não foi devidamente estudada no rigor do âmbito científico e, portanto, não implica dizer que a mesma não irá produzir mais se receber mais água, como por irrigação. Embora haja muita especulação a respeito do consumo hídrico do pinhão-manso, na realidade pouco se sabe de fato e, portanto, o conhecimento atualmente disponível ainda é escasso e constitui um dos principais motivos que inviabilizam a exploração desta cultura no mundo (JONGSCHAAP et al., 2007; ACHTEN et al., 2008; MAES et al., 2009).

Para Jongschaap et al. (2007), a característica do pinhão-manso de ser uma planta que pode sobreviver com baixo consumo hídrico é de fato suportada por dados de campo, como aqueles obtidos por Holl et al. (2007) e Gush (2008). No entanto, Jongschaap et al. (2007) e Li et al. (2010) salientam que a expectativa de combinar esta característica com altas produtividades não é realista. Essa análise tem sido confirmada em estudos recentes. Ao estudar o clima nos prováveis centros de origem do pinhão-manso (México e América Central), Maes et al. (2009) observaram que não é normal a ocorrência natural do pinhão-manso em regiões de clima semi-árido e árido e, também, onde a precipitação anual é inferior a 944 mm. Segundo os autores, essa observação contrasta bastante com o apelo popular no que se refere à preferência climática e a necessidade hídrica da cultura (somente 200 a 300 mm anuais). Estes mesmos autores, assim como Li et al. (2010), ressaltam que os cultivos realizados em regiões áridas e semi-áridas estarão condicionados a apresentarem baixas produtividades, a menos que sejam irrigados. Nesse mesmo contexto, Renner, Zelt e Gerteiser (2008) apresentam estimativas de que quase metade das áreas cultivadas com pinhão-manso no mundo recebe algum tipo de irrigação.

Portanto, a dinâmica do consumo de água do pinhão-manso sob condição irrigada e não irrigada ainda é pouco conhecida e necessita ser devidamente estudada, a fim de aprofundar os conhecimentos sobre a cultura, além de fornecer parâmetros confiáveis que possam

ser utilizados pelas diversas atividades que demandam estas informações (FRANCIS; EDINGER; BECKER, 2005; JONGSCHAAP et al., 2007; ACHTEN et al., 2008; MAES et al., 2009).

O consumo hídrico de uma determinada cultura nada mais é do que a sua evapotranspiração, ou seja, a quantidade de água que é transferida para a atmosfera por evaporação do solo e da vegetação molhada após eventos de chuva ou irrigação e, também, pela transpiração da planta (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998). A evapotranspiração pode ser medida com satisfatória acurácia e resolução temporal utilizando lisímetros de pesagem (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL; SCHNEIDER; JENSEN, 1991; ALLEN et al., 2011). Basicamente, na lisimetria de pesagem a evapotranspiração é obtida por meio de um sistema de pesagem que monitora a variação da massa de um bloco de solo isolado dentro de um tanque, no qual é cultivada a cultura de interesse. Existem diferentes tipos de lisímetros de pesagem. No caso dos lisímetros de pesagem direta, não existe nenhum sistema de redução de massa, sendo a variação de massa do lisímetro determinada eletronicamente utilizando células de carga que suportam diretamente toda a massa do mesmo.

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 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. Segundo Howell (2004), não existe um padrão que possa ser seguido para construir um lisímetro de pesagem. Na realidade, cada lisímetro deve ser projetado para atender as necessidades específicas de cada estudo, além de que o projeto inicial deve ser constantemente revisado durante a fase de construção.

Depois de finalizada a sua construção, os lisímetros de pesagem devem 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). Basicamente, 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. 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 variável 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.

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 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, a variação da temperatura do ar pode introduzir significativa incerteza sobre as medições obtidas (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; ALLEN; FISHER, 1991). 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). 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.

Diante do exposto anteriormente, este trabalho teve como objetivos:

- a) Construir seis lisímetros de pesagem direta que serão utilizados para estudar a evapotranspiração do pinhão-mansão cultivado sem irrigação e com irrigação por pivô central e gotejamento;
- b) Calibrar os lisímetros;
- c) Avaliar a influência da temperatura do ar nos lisímetros;
- d) Avaliar a influência do vento nos lisímetros;
- e) Comparar a qualidade dos lisímetros em função do uso de diferentes células de carga.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Pinhão-manso

Devido ao recente e crescente interesse pela cultura do pinhão-manso, diversas revisões bibliográficas atualizadas podem ser encontradas na literatura, dentre as quais se destacam algumas publicadas no âmbito nacional (ARRUDA et al., 2004) e internacional (OPENSHAW, 2000; JONGSCHAAP et al., 2007; ACHTEN et al., 2008; KUMAR; SHARMA, 2008; HENNING, 2009; MAKKAR; BECKER, 2009; YE et al., 2009; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Estas revisões são um ótimo banco de informações para aqueles que procuram iniciar ou aprofundar seus conhecimentos sobre a cultura.

No presente estudo, procurou-se compilar informações sobre a cultura do pinhão-manso no que refere à sua descrição botânica, produtividade potencial e teor de óleo na semente, exigências edafoclimáticas e consumo hídrico. Com isso, objetivou-se alicerçar o conhecimento sobre a cultura, haja vista que a mesma não é tão comum a todos, tal qual ocorre com outras culturas mais populares.

2.1.1.1 A planta

O pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) foi descrito pela primeira vez em 1.753 pelo botânico sueco Carl Linnaeus. É uma das várias espécies do gênero *Jatropha*, parte integrante da grande e diversa família *Euphorbiaceae*. Muitas espécies pertencentes a esta família são conhecidas pela produção de fitotoxinas, látex e por apresentarem propriedades purgantes (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Segundo Heller (1996), o termo *Jatropha* é derivado do grego *iatrós* (doutor) e *trophé* (alimento), termos estes que remetem às propriedades medicinais que as partes da planta possuem.

O real centro de origem do pinhão-manso ainda é desconhecido, mas a maioria dos trabalhos concorda que, provavelmente, seja o México ou a América Central (HELLER, 1996; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Segundo Brittain e Lutaladio (2010), o pinhão-

manso teria sido dispersado do seu centro de origem por navegantes portugueses, de modo que a planta se encontra naturalmente distribuída no México, América Central, Brasil, Bolívia, Peru, Argentina e Paraguai. Mas na realidade, nos dias atuais a planta se encontra mundialmente difundida, podendo ser facilmente encontrada ao longo de toda a região intertropical (ACHTEN et al., 2008; HENNING, 2009).

A planta se caracteriza por um arbusto grande ou uma árvore pequena (Figura 1A, B e C), a qual pode atingir de 5 a 7 m de altura, dependendo das condições de crescimento (ACHTEN et al., 2008; HENNING, 2009; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Trata-se de uma planta perene, a qual geralmente leva de quatro a cinco anos para atingir a maturidade (HENNING, 2009), mas possui expectativa de vida em torno de 50 anos (ARRUDA et al., 2004; ACHTEN et al., 2008). Para Ye et al. (2009), o pinhão-manso começa a frutificar aos três ou quatro anos de idade nas regiões de clima seco. O seu padrão de crescimento é do tipo simpodial (Figura 1D), ou seja, várias gemas participam consecutivamente da formação de cada eixo e não existe a predominância de um eixo principal, de tal forma que o processo de ramificação é lateralmente realizado e no final de cada ramo aparecem as inflorescências (FERRI, 1983; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010).

O crescimento inicial é rápido. Segundo Heller (1996), apenas 10 dias são necessários para ocorrer a germinação das sementes quando as condições de umidade são boas. Para a produção das mudas utilizando irrigação em ambiente protegido, tendo sementes como material propagativo, Paulino et al. (2011) encontraram que são necessárias, aproximadamente, sete semanas após a semeadura para produzir mudas com qualidade suficiente para transplantá-las.

No campo, o crescimento vegetativo ocorre durante a estação chuvosa (Figura 1A e B). Durante a estação seca (Figura 1C) o crescimento é reduzido e a planta derruba suas folhas (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Segundo Kumar e Sharma (2008) e Henning (2009), a abscisão das folhas do pinhão-manso é um mecanismo interno de defesa da planta que visa reduzir a transpiração em resposta ao déficit hídrico.

Figura 1 – Plantas de pinhão-mansinho em Charqueada-SP com 1 ano e 10 meses de idade durante a estação chuvosa (A), aos 4 anos durante a estação chuvosa (B), aos 4 anos e 6 meses durante a estação seca (C) e padrão de crescimento simpodial da mandioca (*Manihot esculenta* L. Crantz), a qual também pertence a família *Euphorbiaceae* (D)

Fonte: Figura 1A, B e C fornecidas pela empresa Biocapital Participações S/A e Figura 1D adaptada de Embrapa (2011).

O diâmetro do tronco pode atingir 20 cm (Figura 2A), o caule é liso, a madeira é mole e a medula bem desenvolvida, porém pouco resistente. O tronco é dividido desde a base em compridos ramos, os quais apresentam numerosas cicatrizes que são produzidas pela queda das folhas na estação seca (Figura 2B), folhas estas que ressurgem logo após as primeiras chuvas (ARRUDA et al., 2004). A planta de pinhão-mansinho é considerada suculenta (Figura 2C e D), de modo que qualquer ferimento que é provocado na planta resulta em exsudação de látex (ARRUDA et al., 2004; HENNING, 2009; YE et al., 2009; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010).

Figura 2 – Detalhe do tronco (A), ramo com as cicatrizes decorrentes da abscisão foliar (B) e exsudação de látex ocorrendo em ramo (C) e troncos de plantas jovens (D)

As folhas do pinhão-mansinho (Figura 3) são verdes, esparsas e brilhantes, largas e alternas, em forma de palma com três a cinco lóbulos e pecioladas, apresentando nervuras esbranquiçadas e salientes na face inferior (ARRUDA et al., 2004). Outros autores consideram que as folhas apresentam de cinco a sete lóbulos (HELLER, 1996; KUMAR; SHARMA, 2008). Segundo Kumar e Sharma (2008), as folhas são hipostomáticas e os estômatos são do tipo paracítico. As folhas são espessas e de superfície lisa, apresentando estípulas minúsculas e pilosas (YE et al., 2009). O pecíolo tem comprimento de 10-16 cm (YE et al., 2009), enquanto as folhas apresentam comprimento e largura variando de 6 a 15 cm (HELLER, 1996; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Em um estudo para calibrar modelos de estimativa da área foliar do pinhão-mansinho baseado em variáveis biométricas (comprimento e largura da folha), Severino, Vale e Beltrão (2007) encontraram que a área das folhas de pinhão-mansinho variou de 7,33 cm² (folhas pequenas) até 215,92 cm² (folhas grandes).

Figura 3 – Limbo de folhas pequenas de pinhão-mansinho normalmente encontradas em mudas (A) e folha grande de pinhão-mansinho (B)

A planta de pinhão-mansinho é monóica, ou seja, possui os dois sexos em um mesmo indivíduo (ACHTEN et al., 2008; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). As inflorescências (Figura 4A), as quais são produzidas nas terminações dos ramos, apresentam flores (Figura 4B e C) que são unissexuadas (ACHTEN et al., 2008). A proporção de flores masculinas com relação às femininas varia de 13:1 até 29:1 (ACHTEN et al., 2008), de modo que a quantidade de flores masculinas é maior. Nesse mesmo contexto, a proporção apresentada tem uma tendência de queda com o avanço da idade da planta (ACHTEN et al., 2008), o que sugere uma tendência de aumento na capacidade de frutificação (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Segundo Brittain e Lutaladio (2010), a distribuição das flores nas inflorescências se dá com as flores femininas distribuídas na extremidade superior e as masculinas localizadas mais abaixo. Normalmente o florescimento ocorre uma vez por ano (RAJU; EZRADANAM, 2002), mas em regiões de clima úmido, ou no caso de plantas cultivadas sob irrigação, o florescimento pode ocorrer durante quase todo o ano (HELLER, 1996). A polinização é feita por insetos (entomofilia), especialmente abelhas, moscas, formigas e tripses (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010).

Figura 4 – Inflorescência do pinhão-mansó (A) e as flores masculina (B) e feminina (C)
Fonte: Figura 4B e C extraídas de Pan e Xu (2011).

Conforme Nunes et al. (2009), o fruto do pinhão-mansó é seco, com três cocas globosas, liso, coriáceo, capsular, ligeiramente roliço, com ápice e base agudos e, entre os carpídes, observa-se a presença de suaves sulcos. O endocarpo é lenhoso (rijo e duro), com pequenos orifícios nos pontos de união dos carpelos, através dos quais passam cordões fibrosos, que contornam os pontos de junção e se distribuem pelas partes dorsal e ventral das cocas. O fruto seco apresenta deiscência, fazendo com que as cocas se fendam longitudinalmente, expondo as sementes. O fruto apresenta superfície lisa e pericarpo com duas zonas distintas: o exocarpo, película mais fina, e o endocarpo, mais grosso. Próximo à deiscência, o exocarpo desprende-se do fruto, dando-lhe um aspecto mais áspero. O comprimento dos frutos pode variar de 2,8 a 3,4 cm, enquanto que para a largura esse valores são da ordem de 2,3 a 3,3 cm. Segundo Nunes et al. (2009) e Dranski et al. (2010), a coloração do fruto varia de acordo com o grau de maturação de verde-cana (fruto jovem) a amarelo e, finalmente, marrom-escuro, quando maduro (Figura 5).

A	B			
	Maturation stage	Epicarp color	Visual Characterization	Munsell chart*
	1		Green Fruit	7,5 GY 6/6
	2		Fruit at the beginning of yellow pigmentation	2,5 GY 5/10
	3		Predominantly yellow fruit	5 Y 8/10
	4		Fruit at the beginning of brown pigmentation	5 Y 8/8
	5		Mature fruit	7 YR 4/2
	6		Dry fruit at the beginning of dehiscence	5YR 3/2

Figura 5 – Frutos de pinhão-mansó em diferentes graus de maturação (A) e escala de avaliação da maturação de frutos (B) proposta por Dranski et al. (2010)

Fonte: Figura 5A extraída de Brittain e Litaladio (2010) e Figura 5B extraída de Dranski et al. (2010).

No interior do fruto existem geralmente três sementes (Figura 6). A semente é endospérmica e apresenta forma ovalada, dorso convexo, envoltório liso, coloração preta, marcada por suaves estrias. Apresenta rafe pouco evidente e presença de carúncula, situada próxima à micrópila, presa na parte ventral. Quando a semente está seca, a carúncula tem a extremidade cônica, com dois lóculos pouco visíveis. Dentro da semente encontra-se o albúmem ou endosperma, de coloração branca, tenro e rico em óleo. O embrião é munido de dois cotilédones foliáceos, muito largos, porém, pouco espessos, os quais funcionam temporariamente como órgão de reserva (NUNES et al., 2009). Segundo Henning (2009), após a fertilização da flor as sementes de pinhão-mansão são formadas no interior do fruto e são necessários de dois a quatro meses para sua completa maturação. Quando maduras, as sementes apresentam comprimento e largura médios de 1,8 e 1 cm, respectivamente. Ainda nesse contexto, o peso de mil sementes é de aproximadamente 680 g, logo, 1 kg de sementes representa algo em torno de 1.470 sementes.

Figura 6 – Sementes de pinhão-mansão

Segundo Reubens et al. (2011), na fase inicial de desenvolvimento (germinação e plântula) o sistema radicular do pinhão-mansão é bastante simétrico e previsível, sendo composto por uma raiz principal e outras quatro raízes laterais de primeira ordem que são bastante similares entre si (Figura 7A). Estas raízes laterais de primeira ordem são perpendicularmente orientadas a partir da principal, além de serem emitidas aproximadamente na mesma profundidade (2,48-2,65 cm).

Figura 7 – Sistema radicular do pinhão-mansinho na fase de plântula (A) e planta adulta (B)
Fonte: Figura 7B extraída de Reubens et al. (2011).

Com o passar do tempo, outras raízes laterais de primeira ordem aparecem, bem como raízes de ordem superior. Com isso, o sistema radicular vai perdendo um pouco de sua simetria e grande quantidade de raízes superficiais começam a surgir (REUBENS et al., 2011).

Para plantas adultas, aquelas quatro raízes laterais de primeira ordem que se desenvolveram na fase inicial continuam a crescer, de modo que na fase adulta ainda são claramente dominantes se comparadas às demais raízes laterais (REUBENS et al., 2011). No entanto, o ângulo de inclinação destas raízes passa a ser mais inclinado, o que promove o maior aprofundamento destas no solo. Assim, o sistema radicular da planta adulta é mais ramificado e pode ser dividido em três grandes estruturas (Figura 7B):

- Quatro a oito raízes laterais de longo alcance e que crescem quase que na horizontal;
- Algumas raízes laterais de crescimento mais inclinado ou quase vertical (em alguns casos são raízes do tipo dreno, as quais crescem paralelamente a raiz principal);
- A raiz principal propriamente dita, a qual é limitada na sua extensão vertical, mas se divide em várias raízes estruturantes que continuam a crescer em profundidade.

Desta forma, Reubens et al. (2011) acreditam que a estrutura do sistema radicular do pinhão-mansão tem potencial para a conservação do solo. Segundo os referidos autores, as raízes laterais podem diminuir a erosão do solo provocada pelo vento ou água devido ao aumento na sua coesão. Além disso, a raiz principal e as do tipo dreno, devido ao seu aprofundamento no perfil, agem estruturando o solo contra deslizamentos de encostas. Por fim, os autores acreditam que essa característica do sistema radicular do pinhão-mansão favorece a exploração da umidade localizada em camadas subsuperficiais, o que pode ser uma importante propriedade em regiões de pouca disponibilidade hídrica, pois deverá aumentar o acesso a água.

As plantas de pinhão-mansão podem ser propagadas por diversas vias, sendo que cada método apresenta suas vantagens e desvantagens. No entanto, segundo Achten et al. (2008) e Severino et al. (2011), uma desvantagem que chama a atenção no caso de plantas propagadas por estaquia, consiste no fato de estas não produzirem a raiz principal (Figura 8). Por isso, baseado em suas observações, Severino et al. (2011) acreditam que plantas propagadas por estaquia apresentam sistema radicular mais concentrado nas camadas superficiais, o que resulta em menor capacidade de exploração das camadas mais profundas do solo. Esse fato, segundo os autores, pode reduzir o acesso da planta a água e nutrientes, além de que, devido ao sistema radicular ficar menos ancorado ao solo, a planta pode ficar mais suscetível ao tombamento no caso da ocorrência de ventos fortes.

Figura 8 – Sistema radicular do pinhão-mansão propagado por estaquia
Fonte: Figura extraída de Severino et al. (2011).

2.1.1.2 Produtividade potencial e teor de óleo

A produtividade potencial do pinhão-mansão constitui uma resposta fenotípica que depende do material genético utilizado e do ambiente em que a mesma é cultivada. Assim, atualmente é difícil precisar valores de produtividade potencial do pinhão-mansão. Isso se deve a diversos motivos, sendo estes sempre ligados ao fato de tudo ser muito recente quando se trata desta cultura e, portanto, existirem poucos estudos realizados com a mesma. Achten et al. (2008) citam alguns desses motivos: a) a espécie ainda ser não pode ser considerada domesticada, devido ao fato de não ter sido conduzido nenhum programa consistente de melhoramento; b) as técnicas de cultivo (irrigação, espaçamento de plantio, adubação, poda, entre outros) ainda não foram devidamente estudadas e c) não existem estudos confiáveis a respeito da produtividade, seja pelo tempo de avaliação ou pelo fato de haver extrapolações de produtividade da escala de uma planta para a escala de lavoura.

Mesmo assim, Jongschaap et al. (2007), Lapola, Priess e Bondeau (2009) e Li et al. (2010), realizaram simulações em escala global que apresentaram resultados bastante consistentes entre si. Para Jongschaap et al. (2007), a produtividade do pinhão-mansão pode variar de 1,5 a 7,8 Mg ha⁻¹ de sementes secas. Esses valores se aproximam daqueles encontrados por Li et al. (2010), a saber, 0 a 7,62 Mg ha⁻¹. Em simulações específicas para o Brasil, Lapola, Priess e Bondeau (2009) encontraram valores de produtividade sem irrigação que podem variar de 0,59 a 5,64 Mg ha⁻¹, e 4,88 a 6,26 Mg ha⁻¹ para cultivos irrigados. Além disso, os autores encontraram que, para cultivos não irrigados, as maiores produtividades são esperadas na região sul do Brasil, enquanto que para os cultivos irrigados, as maiores produtividades se encontram no sul e leste brasileiro (Figura 9).

Figura 9 – Produtividade potencial do pinhão-mansô cultivado sem irrigação (A) e com irrigação (B) para as diferentes regiões brasileiras

Fonte: Figuras adaptadas de Lapola, Priess e Bondeau (2009).

A mesma incerteza que é observada para a produtividade do pinhão-mansô, também existe com relação ao rendimento de óleo por unidade de área, já que este depende da produtividade. Além disso, o teor de óleo na semente também é influenciado pela combinação dos fatores genético e ambiental (ACHTEN et al., 2008). Mesmo assim, em um trabalho bastante extenso de revisão, Achten et al. (2008) avaliaram diversos estudos já realizados de maneira isolada com o pinhão-mansô e encontraram que, na média, a semente de pinhão-mansô apresenta 34,4% de óleo. Desta maneira, considerando-se os extremos de produtividade de sementes mencionados por Lapola, Priess e Bondeau (2009) para as condições brasileiras (0,59 a 6,26 Mg ha^{-1}), o rendimento potencial de óleo esperado no Brasil varia de 203 a 2.153 kg ha^{-1} . Segundo relata Fairless (2007), a cultura do pinhão-mansô apresenta rendimento de óleo por unidade de área superior ao de culturas mais tradicionais, como a soja, canola e girassol.

2.1.1.3 Exigências edafoclimáticas

O pinhão-mansô é uma espécie que apresenta alta adaptabilidade ecológica, o que confere a ela a possibilidade de crescer em regiões de características de solo e clima bastante

distintas (HELLER, 1996; ARRUDA et al., 2004; ACHTEN et al., 2008; KUMAR; SHARMA, 2008; MAKKAR; BECKER, 2009).

Maes et al. (2009) realizaram um estudo aprofundado sobre a preferência climática do pinhão-manso. Os autores coletaram informações em herbários a respeito da localização de amostras de pinhão-manso que foram retiradas do seu provável centro de origem (México e América Central) e que posteriormente foram catalogadas. Em seguida, cruzaram estas localizações com o clima de ocorrência no local. Assim, observaram que não é comum encontrar o pinhão-manso em regiões de clima árido e semi-árido (tipo B da classificação climática de Köppen-Geiger) e que o mesmo não ocorre naturalmente onde a precipitação anual é inferior a 944 mm. Segundo os autores, o pinhão-manso foi verificado em locais onde a precipitação variou de 944 a 3.121 mm, mas a faixa ótima é de, aproximadamente, 1.200 a 2.000 mm. Para Maes et al. (2009), essa observação contrasta bastante com o que é normalmente pregado a respeito da preferência climática do pinhão-manso e também do seu requerimento hídrico, pois segundo os autores, frequentemente são citados valores de necessidade hídrica da cultura da ordem de 200 a 300 mm anuais. Estes mesmos autores, assim como Li et al. (2010), ressaltam que os cultivos realizados em regiões áridas e semi-áridas estarão condicionados a apresentarem baixas produtividades, a menos que sejam irrigados. Baseado nas observações de Maes et al. (2009), o clima preferido pelo pinhão-manso é o tropical (tipo A da classificação climática de Köppen-Geiger), sendo preferidos os tipos A_w (clima tropical com chuvas no verão) e A_m (clima tropical de monção, apresentando precipitação anual maior que 1.500 mm e no mês mais seco menor que 60 mm). Quanto a temperatura, os autores relatam que a média da temperatura mínima no mês mais frio foi sempre superior a 7 °C (10,5 a 21,2 °C). Segundo os autores, esta temperatura é considerada um limite, abaixo do qual a ocorrência de geadas é provável e o pinhão-manso sofreria com a mesma. Com relação à temperatura média anual, Maes et al. (2009) encontraram que a faixa ótima de temperatura se encontra entre 23,4 e 26,2 °C.

Outros autores também abordam a preferência climática do pinhão-manso. Para Heller (1996) e Makkar e Becker (2009), o pinhão-manso é uma cultura bem adaptada a áreas secas. No entanto, Achten et al. (2008) e Makkar e Becker (2009) destacam que melhores resultados têm sido observados quando a cultura é implantada em condições úmidas. Porém, esta umidade adicional tem restrições, pois segundo Heller (1996), a planta é avessa a condições de excesso de umidade, semelhante ao que ocorre na região amazônica.

Heller (1996), ao analisar a distribuição geográfica do pinhão-mansão àquela data, encontrou que a introdução da planta foi predominantemente realizada em regiões onde a precipitação média anual é de 300 a 1.000 mm. Para Foidl et al. (1996), a planta pode crescer em locais de precipitação média anual entre 250 e 3.000 mm, o que representa uma faixa bastante dilatada. Openshaw (2000) considera valores de 200 a 1.500 mm, enquanto Wiesenhütter (2003) menciona valores de 500 a 600 mm. Para Achten et al. (2008), pelo menos 500 a 600 mm ano⁻¹ são necessários para que o pinhão-mansão produza um mínimo para permitir realizar a colheita. Kheira e Atta (2009) consideram que a planta pode crescer bem em condições de baixa pluviosidade, requerendo apenas 200 mm para sua sobrevivência. No entanto, estes autores acreditam que a planta também responde bem a condições melhores (até 1.200 mm), especialmente em climas mais quentes.

Segundo Foidl et al. (1996), o pinhão-mansão é encontrado em regiões com altitude variando entre 0 e 1.800 m. Ye et al. (2009) reportam que na China o pinhão-mansão é encontrado até 2.000 m de altitude, mas a maioria das áreas estão localizadas abaixo de 1.600 m. Para Heller (1996), no seu provável centro de origem o pinhão-mansão ocorre prioritariamente em condições de baixa altitude, normalmente entre 0 e 500 m. Segundo o autor, é possível concluir que esta seja uma cultura adaptada a condições de altas temperaturas, pois nessas altitudes onde o pinhão-mansão pode ser encontrado a temperatura média anual varia entre 20 e 28 °C. Para Kumar e Sharma (2008) e Henning (2009), o pinhão-mansão gosta de altas temperaturas, como aquelas que são típicas de regiões tropicais e subtropicais. Para Li et al. (2010), as maiores produtividades do pinhão-mansão estão associadas a climas tropicais e temperados (temperatura média anual entre 18 e 25 °C), sem estação seca e com verão quente. Makkar e Becker (2009) consideram que temperaturas na faixa de 23 a 25 °C podem ser consideradas ótimas, além de que a planta pode tolerar elevadas temperaturas acima de 40 °C. Ainda segundo estes autores, se durante uma semana, ou até períodos menores, a temperatura for consistentemente abaixo de 20 °C, a planta inicia o processo de abscisão foliar.

Conforme Wiesenhütter (2003), Andrade et al. (2008), Kumar e Sharma (2008) e Henning (2009), o pinhão-mansão é uma planta sensível a geadas. Andrade et al. (2008) realizaram um experimento com plantas jovens de pinhão-mansão (10 meses de idade), as quais estavam sendo cultivadas em casa de vegetação e possuíam aproximadamente 40 cm de altura e 10 folhas por planta. Essas plantas foram submetidas a diferentes tratamentos, variando-se a

temperatura mínima usando câmaras de crescimento. Basicamente, os tratamentos constituíram-se da aplicação de temperaturas de 1 a -5 °C durante uma hora consecutiva. Após a aplicação dos tratamentos, as plantas foram reconduzidas a casa de vegetação e foram monitoradas periodicamente, considerando-se o seu aspecto visual e a taxa fotossintética. Com base nos resultados encontrados, Andrade et al. (2008) concluíram que a temperatura mínima letal para o pinhão-manso está entre -3 e -4 °C e que as plantas que foram submetidas a temperaturas mais altas não sofreram nenhum dano ou sofreram danos mínimos, de modo que após um mês da aplicação dos tratamentos as plantas se recuperaram e se encontravam semelhantes àquelas do tratamento controle.

Segundo Ye et al. (2009), o pinhão-manso é uma planta exigente em insolação e não cresce bem sob condições de sombreamento. Zhang e Fan (2005 apud YE et al., 2009) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar a resposta fotossintética do pinhão-manso quando conduzido sob irrigação, a qual mantinha a umidade do solo dentro do vaso em 65%, e do pinhão-manso conduzido sem irrigação, com umidade de 45%. Para o pinhão-manso irrigado os autores encontraram que o ponto de compensação e saturação luminosa da fotossíntese foram de 163,41 e 1.046,73 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Para as plantas do tratamento não irrigado, o valor do ponto de compensação luminosa foi de 193,82 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, valor bastante próximo ao encontrado no tratamento irrigado. Esses valores vão de encontro com o esperado, pois o ponto de compensação luminosa é na realidade característico para cada espécie e representa o ponto onde as taxas de fotossíntese e respiração são equivalentes. Ainda assim, nota-se que no tratamento conduzido sem irrigação, fez-se necessária maior quantidade de energia para haver a compensação quando comparado ao tratamento irrigado. Por outro lado, o ponto de saturação luminosa no tratamento não irrigado foi de 697,08 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, abaixo do encontrado no tratamento irrigado. O ponto de saturação luminosa representa o ponto no qual, mesmo que seja aumentada a quantidade de energia radiante que atinge a folha, a taxa fotossintética não é aumentada. Assim, os autores concluíram que as melhores condições de umidade no solo do tratamento irrigado favoreceram a observação de uma melhor resposta fotossintética por parte das plantas.

O pinhão-manso é uma planta que pode crescer em uma grande variedade de solos (HELLER, 1996; ACHTEN et al., 2008; YE et al., 2009). Para Heller (1996), a planta pode ser cultivada em solos com boa drenagem, boa aeração e é bem adaptada a solos marginais que apresentam pouca fertilidade química natural. Segundo o autor, a cultura também tolera solos

rochosos e áreas mais declivosas. Por outro lado, acredita que em solos de textura mais fina o crescimento radicular seja reduzido. Henning (2009) acredita que o pinhão-mansinho pode crescer bem em solos arenosos, com certo grau de empedramento e bem drenados, mas não tolera o encharcamento. Segundo Ye et al. (2009), o pinhão-mansinho se desenvolve bem em solos profundos, férteis e sem compactação. Porém, não tolera solo muito aderente, impermeável e sujeito a encharcamento. Makkar e Becker (2009) relatam que é frequente o cultivo do pinhão-mansinho em solos secos, pedregosos e muito rasos. De modo semelhante, os autores consideram que a planta é bem adaptada a condições de baixa fertilidade do solo e que sintomas de deficiências nutricionais são raramente observados. Baseado nessa constatação, os autores acreditam que a planta deve possuir uma enorme capacidade para absorver e utilizar os nutrientes quando submetida a condições de solos de pouca fertilidade, especialmente os deficientes em fósforo e solos ácidos. Com base na ausência de relatos que demonstrem a existência de associações simbióticas na raiz do pinhão-mansinho com rizóbios fixadores de nitrogênio, Openshaw (2000) concluiu que ela não é uma planta fixadora de nitrogênio. Por outro lado, o autor relata que pode ocorrer a presença de micorrizas, as quais auxiliam na absorção do fósforo.

Em um experimento realizado por Valdes-Rodriguez et al. (2011) semeou-se diretamente o pinhão-mansinho em solos de textura grossa, média e fina. As mudas cresceram em estufa, dentro de sacos plásticos de 40 x 40 cm e foram irrigadas. Após um mês as mudas foram avaliadas quanto a diversas variáveis biométricas da parte aérea e radicular. Baseado nos resultados encontrados, os autores concluíram que as mudas apresentaram melhor crescimento quando cultivadas no solo de textura média, seguido pelo de textura fina e, por fim, o de textura grossa.

Silva et al. (2009) avaliaram a produção de matéria seca total de mudas de pinhão-mansinho cultivadas em solução nutritiva completa e em soluções com omissão de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn ou Zn de forma isolada. Os autores concluíram que os elementos que mais limitaram a produção de matéria seca das mudas foram: $Ca > Mg > K > N > P > S$, para os macronutrientes; e $Fe > Cu > Mn > B$, para os micronutrientes. Em outro trabalho, Laviola e Dias (2008) estudaram o teor e o acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão-mansinho já em fase de produção. Os autores encontraram que os nutrientes mais acumulados nas folhas apresentaram a seguinte ordem: $N > Ca > K > Mg > P > S > Mn > Fe > B > Zn > Cu$. Nos frutos a ordem foi a seguinte: $N > K > Ca > P \geq Mg > S > Mn > Fe > B > Zn > Cu$.

2.1.1.4 Consumo hídrico

Embora haja muita especulação a respeito do consumo hídrico do pinhão-mansão, na realidade ainda pouco se sabe a respeito. Praticamente não existem trabalhos que tratem deste tema e que tenham sido publicados após a avaliação sob o rigor técnico e científico. Desta forma, o conhecimento atualmente disponível sobre o consumo hídrico do pinhão-mansão ainda é escasso e constitui um dos principais motivos que inviabilizam a exploração desta cultura no mundo (JONGSCHAAP et al., 2007; ACHTEN et al., 2008; MAES et al., 2009).

Os trabalhos publicados por Holl et al. (2007) e Gush (2008) foram os únicos encontrados na literatura nacional e internacional tratando da quantificação do consumo hídrico do pinhão-mansão. Na realidade, esses trabalhos são semelhantes, pois o primeiro se refere ao relatório completo do projeto de pesquisa, enquanto o segundo constitui um artigo publicado em periódico científico contendo apenas parte do relatório.

Gush (2008) estudou a transpiração de plantas de pinhão-mansão conduzidas sem irrigação e em áreas com solos pouco férteis. O autor obteve medidas do fluxo de seiva de plantas jovens (4 anos) e maduras (12 anos) para avaliar o consumo hídrico destas. As medidas foram realizadas por período de 17 meses usando o método da razão de calor (BURGESS et al., 2001). Segundo Gush (2008), esse método foi escolhido devido a sua habilidade para medir taxas pequenas de fluxo, o que costuma ser característico das plantas que crescem sem irrigação nesses locais avaliados.

Considerando um período de um ano, o autor encontrou fluxo de seiva de, aproximadamente, 1.940 L pl^{-1} para plantas jovens e 4.460 L pl^{-1} para plantas maduras. Esses valores foram extrapolados da escala de uma planta para de lavoura considerando população de 740 pl ha^{-1} , o que representou consumo hídrico de, aproximadamente, 144 e 330 mm ano^{-1} para plantas jovens e maduras, respectivamente.

O autor considerou que o fluxo de seiva variou com o tempo devido em grande parte a natureza decidual da espécie, embora também haja influência da duração do dia e da precipitação. Valores diários foram bastante influenciados pela disponibilidade energética (radiação solar), pelo déficit de pressão de vapor atmosférico e pelos eventos de chuva que restituíam a umidade do solo. Para plantas jovens, o maior valor de fluxo de seiva diário foi de $32,9 \text{ L dia}^{-1}$ ($2,4 \text{ mm dia}^{-1}$), enquanto que a média diária ao longo do ano foi de,

aproximadamente, 5,3 L dia⁻¹ (0,4 mm dia⁻¹). Para plantas maduras, esses valores foram 79,6 e 12,3 L dia⁻¹ (5,9 e 0,9 mm dia⁻¹), respectivamente.

Durante o inverno seco e frio, foi observado que o fluxo de seiva parou, tanto em plantas jovens quanto em plantas maduras, cessando a transpiração nesse período. Para o autor, esse fato se deve à combinação dos fatores baixa temperatura, pouca radiação solar, decréscimo na umidade do solo e alterações fisiológicas nas plantas (queda das folhas).

2.1.2 Evapotranspiração

2.1.2.1 Definição

A evapotranspiração é um dos componentes mais básicos do ciclo hidrológico e consiste no processo pelo qual a água é transferida pela superfície terrestre em direção à atmosfera (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990). Na realidade, a evapotranspiração corresponde a ocorrência simultânea de dois processos diferentes, mas que normalmente são difíceis de serem distinguidos entre si. Estes processos são a evaporação e a transpiração (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998).

Segundo Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997), o conceito de evapotranspiração foi criado na década de 40 por Thornthwaite para expressar essa ocorrência simultânea. Anteriormente utilizava-se o termo uso consuntivo, o qual difere do conceito de evapotranspiração, pois também considera a quantidade de água que é retida na constituição dos tecidos da planta, a qual é substancialmente menor que a evapotranspiração (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

2.1.2.2 Evaporação

Segundo Allen et al. (1998), a evaporação é o processo pelo qual a água líquida se converte em vapor d'água (vaporização) e é retirado da superfície evaporante (remoção do vapor). A água pode ser evaporada de uma variedade de superfícies, desde lagos e rios, até solos e a vegetação molhada pela chuva ou pela água de irrigação.

Para promover a conversão das moléculas de água da forma líquida para a forma de vapor é necessário o aporte de energia. A radiação solar direta e, em menor grau, a temperatura do ar, proporcionam esta energia. A força que promove a retirada do vapor d'água de uma superfície evaporante corresponde à diferença entre a pressão de vapor d'água na superfície e aquela existente na atmosfera circundante. No entanto, à medida que ocorre a evaporação, o ar circundante se satura gradualmente e o processo de evaporação vai se tornando cada vez mais lento. Assim, se o ar circundante não for removido das proximidades da superfície evaporante, o mesmo irá se saturar e a evaporação irá parar completamente. Essa renovação do ar que circunda a superfície evaporante é realizada pelo vento. Desta forma, para avaliar o processo de evaporação faz-se necessário considerar os parâmetros climáticos radiação, temperatura do ar, umidade atmosférica e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998).

Quando a superfície evaporante em questão é a superfície do solo, o grau de cobertura do mesmo por parte da vegetação e a quantidade de água disponível na sua superfície são outros fatores que influenciam o processo. Chuvas frequentes, a irrigação e a ascensão capilar em um solo com lençol freático raso, mantém a sua superfície úmida. Em regiões onde o solo é capaz de prover a água com velocidade suficiente para atender a demanda por evaporação do mesmo, este processo é limitado exclusivamente pelas condições meteorológicas reinantes. Por outro lado, nos casos em que o intervalo entre chuvas ou irrigação é grande e a capacidade do solo de conduzir a umidade em direção a superfície é reduzida, o conteúdo de água nos horizontes superficiais diminui e a superfície do solo se seca. Nessas condições, a disponibilidade limitada de água exerce um controle sobre a taxa de evaporação do solo. Na ausência de qualquer fonte para reabastecer de água a superfície do solo, a evaporação irá diminuir rapidamente e pode até parar quase que totalmente em um curto período de tempo (ALLEN et al., 1998).

2.1.2.3 Transpiração

Segundo Allen et al. (1998), a transpiração consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos da planta e na sua posterior remoção para a atmosfera.

A saída da água na transpiração das plantas se dá predominantemente pelos estômatos, os quais são pequenas aberturas nas folhas através das quais as plantas promovem o intercâmbio de gases e vapor d'água com a atmosfera. Basicamente, o processo se dá com a água,

juntamente com alguns nutrientes, sendo absorvida pelas raízes e transportada através da planta. Então, a vaporização da água ocorre dentro da folha, nos espaços intercelulares, e o intercâmbio do vapor d'água com a atmosfera é controlado pela abertura estomática (ALLEN et al., 1998).

A transpiração, assim como mencionado para a evaporação direta, depende do aporte de energia, do gradiente de pressão de vapor e da velocidade do vento. Portanto, a radiação, a temperatura do ar, a umidade atmosférica e a velocidade do vento também devem ser levadas em consideração quando da sua análise. O conteúdo de água no solo e a capacidade deste em conduzir a água até as raízes também influenciam as taxas de transpiração, assim como a salinidade do solo e da água de irrigação. A taxa de transpiração também é influenciada pelas características do cultivo em questão, do meio onde este é produzido, da sua fase fenológica e do seu manejo (ALLEN et al., 1998).

2.1.2.4 Fatores que afetam a evapotranspiração

2.1.2.4.1 Fatores climáticos

Como a evapotranspiração corresponde à ocorrência simultânea dos processos de evaporação e transpiração, é natural que os fatores climáticos que influenciem ambos, sejam considerados como fatores que influenciam a evapotranspiração.

Assim, Allen et al. (1998) consideram que a radiação, a temperatura do ar, a umidade atmosférica e a velocidade do vento são fatores determinantes da evapotranspiração.

2.1.2.4.2 Fatores relacionados ao cultivo

O tipo de cultivo, a variedade e a fase fenológica são fatores que devem ser considerados ao se avaliar a evapotranspiração de cultivos realizados em grandes áreas e que são bem manejadas. As diferenças na resistência a transpiração, altura, rugosidade do cultivo, albedo, dinâmica de cobertura do solo pelo dossel e as características do sistema radicular são fatores que podem resultar em diferentes níveis de evapotranspiração nos diversos tipos de cultivos, mesmo que estes se encontrem sob as mesmas condições ambientais (ALLEN et al., 1998).

2.1.2.4.3 Fatores relacionados ao manejo e às condições ambientais

A salinidade e a baixa fertilidade do solo, a aplicação limitada de fertilizantes, a presença de camadas compactadas, o mau controle de pragas e doenças e o mau manejo do solo podem limitar o desenvolvimento do cultivo e reduzir a sua evapotranspiração. Outros fatores também devem ser considerados, entre eles, a cobertura do solo, a densidade do cultivo e o conteúdo de água no solo. O efeito do conteúdo de água no solo sobre a evapotranspiração é determinado principalmente pela magnitude do déficit hídrico e pelo tipo de solo. Por outro lado, o excesso hídrico também deve ser considerado. O excesso de água no solo resultará na saturação do mesmo e isso pode prejudicar o sistema radicular da planta e reduzir a sua capacidade de extração de água devido à inibição da respiração (ALLEN et al., 1998).

Ao avaliar a evapotranspiração, outros fatores também devem ser considerados, por exemplo, as práticas de manejo que interferem nos fatores climáticos e do cultivo, as quais afetam a evapotranspiração. As práticas de cultivo e o método de irrigação podem alterar o microclima, afetar as características do cultivo ou afetar o molhamento do solo e do dossel vegetativo. A presença de quebra-ventos reduz a velocidade do vento e, por consequência, reduz a evapotranspiração na área localizada a jusante. Esse efeito pode ser especialmente significativo nas condições de clima com bastante vento, quente e seco. A evaporação do solo em um pomar jovem, onde as árvores são largamente espaçadas, pode ser reduzida utilizando um sistema bem dimensionado de irrigação localizada. Nesse caso, a aplicação da água é realizada na base das plantas, de modo que a maior parte do solo é mantida seca, fato que limita as perdas de água por evaporação. O uso de coberturas sintéticas ou palhada nas entrelinhas constitui-se em outra maneira de reduzir a evaporação nesta situação. Antitranspirantes tais como aqueles que atuam promovendo o fechamento estomático ou películas bloqueadoras ou, até mesmo, o uso de materiais reflexivos, podem reduzir as perdas por transpiração pela cultura (ALLEN et al., 1998).

2.1.2.5 Conceitos de evapotranspiração

2.1.2.5.1 Evapotranspiração de referência (ET_0)

Segundo Allen et al. (1998), a evapotranspiração do cultivo de referência, ou simplesmente evapotranspiração de referência (ET_0), corresponde à taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência que não experimenta restrição hídrica. Na prática, essa superfície corresponde a um cultivo hipotético de grama com características específicas. Segundo estes autores, a substituição do termo ET_0 por evapotranspiração potencial não é recomendada devido às ambiguidades que são encontradas na sua definição.

O conceito de ET_0 foi introduzido para estudar a demanda evapotranspirativa da atmosfera, independente do tipo e do desenvolvimento do cultivo, e também das práticas de manejo. Devido ao fato de haver água prontamente disponível para a superfície de referência, os fatores do solo não apresentam nenhuma influência sobre a taxa evapotranspiratória. Assim, os únicos fatores que afetam a ET_0 são os parâmetros climáticos e, portanto, ET_0 também pode ser considerada um parâmetro climático e pode ser estimada utilizando dados obtidos rotineiramente em estações meteorológicas. Portanto, ET_0 expressa o poder evaporante da atmosfera em uma determinada localidade e época do ano, sem levar em consideração as características do cultivo e os fatores do solo (ALLEN et al., 1998).

O fato de atrelar a evapotranspiração a uma superfície específica permite contar com uma referência a qual se pode comparar a evapotranspiração de outras superfícies. Além disso, elimina-se a necessidade de definir um nível de evapotranspiração para cada cultivo e cada período de crescimento. Ainda, os valores de ET_0 em diferentes localidades e em diferentes épocas do ano podem ser comparados entre si, pois se trata da evapotranspiração que ocorre na mesma superfície de referência (ALLEN et al., 1998).

Penman (1948) foi o primeiro a estabelecer um método combinado para estimar a ET_0 (BOS et al., 2009). Este método recebe essa denominação porque combina, em uma mesma equação, componentes energéticos e aerodinâmicos. Assim, o autor combinou o balanço energético e o método da transferência de massa e derivou uma equação para calcular a evaporação em uma superfície aberta de água, a qual foi considerada como superfície de

referência. Nessa equação as estimativas podiam ser obtidas a partir dos dados climáticos de insolação, temperatura, umidade atmosférica e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998), o método de Penman (1948) foi posteriormente aperfeiçoado por muitos pesquisadores e ampliado para a condição de superfícies cultivadas por meio da introdução de fatores de resistência (aerodinâmica e superficial). Segundo Bos et al. (2009), um destes pesquisadores foi Monteith, o qual na década de 60 (MONTEITH, 1965) usou princípios físicos similares aos utilizados por Penman e desenvolveu uma equação melhorada, a qual é internacionalmente conhecida como equação de Penman-Monteith e se encontra descrita na sua forma reduzida em Allen et al. (1998).

Na equação de Penman-Monteith, a superfície de referência foi parametrizada com sendo correspondente a um cultivo hipotético com altura assumida de 0,12 m, resistência superficial de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23. Na prática, esta superfície representa uma área extensa de grama verde, com altura uniforme, apresentando crescimento ativo, sombreando totalmente o solo e sendo mantida sem restrição hídrica (ALLEN et al., 1998).

Dados de ET_0 determinados por lisímetros de pesagem no mundo todo foram utilizados para avaliar as estimativas obtidas pelo método de Penman-Monteith e muitos outros métodos (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990). Neste estudo concluiu-se que o método de Penman-Monteith é aquele que melhor estima a ET_0 para uma grande diversidade de condições climáticas e, por isso, atualmente é o método recomendado pela FAO (ALLEN et al., 1998) e pela ASCE (ASCE-EWRI, 2005) como método padrão para a estimativa da ET_0 . Segundo Allen et al. (1998), a ET_0 pode ser estimada pelo método de Penman-Monteith nas escalas diária, semanal, decendial ou mensal, utilizando-se como dados de entrada a elevação do local com relação ao nível do mar, a latitude, temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar global e velocidade do vento.

Para Allen et al. (2006), o método de Penman-Monteith, na sua forma recomendada pela FAO (ALLEN et al., 1998), recebeu ampla aceitação e aplicação ao redor de todo o mundo. No entanto, com o crescente desenvolvimento e instalação de redes de estações meteorológicas com capacidade para gerar dados horários, nos últimos anos tem sido aumentado o interesse pela obtenção de estimativas de ET_0 também em escala horária.

Inicialmente as estimativas horárias de ET_0 foram obtidas aplicando-se os dados meteorológicos horários diretamente na equação de Penman-Monteith parametrizada para o

cálculo diário. Porém, segundo Allen et al. (2006), estudos recentes demonstraram que o valor da resistência superficial durante o dia é menor que o adotado (70 s m^{-1}) na equação de Penman-Monteith descrita em Allen et al. (1998). Desta forma, ASCE-EWRI (2005), endossado por Allen et al. (2006), recomenda a adoção de resistências superficiais variáveis durante o dia no caso da determinação da ET_0 na escala horária. Assim, estes autores recomendam um valor menor de resistência superficial durante o dia (50 s m^{-1}) e outro maior durante o período noturno (200 s m^{-1}). Os autores ainda ressaltam que toda a parametrização para a escala diária descrita em Allen et al. (1998) permanece inalterada. Portanto, a metodologia completa para a estimativa horária da ET_0 pelo método de Penman-Monteith pode ser encontrada em ASCE-EWRI (2005).

Considerando-se o disposto em Allen et al. (1998), o qual trata da estimativa da ET_0 nas escalas diária ou superiores, e o disposto em ASCE-EWRI (2005), o qual dispõe sobre a estimativa da ET_0 na escala horária, o método de Penman-Monteith pode ser representado pela eq. (1):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u)} \quad (1)$$

na qual ET_0 é a evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith na escala diária (mm dia^{-1}) ou horária (mm hora^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é a radiação líquida na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); C_n é a constante do numerador que varia com o tempo de análise (Tabela 1); T é a temperatura do ar medida a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$); u é a velocidade do vento medida a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a tensão de saturação de vapor (kPa); e_a é a tensão parcial de vapor (kPa); C_d é a constante do denominador que varia com o tempo de análise (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores da constante do numerador (C_n) e constante do denominador (C_d) para utilização na eq. (1) em função do tempo de análise da evapotranspiração de referência (ET_0) e da radiação líquida horária (R_n)

Tempo de análise da ET_0 e R_n	C_n	C_d
Diário	900	0,34
Horário com $R_n > 0$	37	0,24
Horário com $R_n \leq 0$	37	0,96

2.1.2.5.2 Evapotranspiração do cultivo sob condição padrão (ET_c)

A evapotranspiração do cultivo sob condição padrão, ou simplesmente evapotranspiração do cultivo (ET_c), 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 ET_c 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. Porém, ainda existe uma considerável falta destas informações para os diferentes cultivos, fato que implica na utilização do método de Penman-Monteith apenas para estimar os valores de ET_0 (ALLEN et al., 1998).

Assim, a prática recomendada para estimar valores de ET_c baseia-se no conceito de duas fases, onde na primeira os valores de ET_0 são determinados localmente utilizando dados de estações meteorológicas e, na segunda, valores de coeficiente de cultivo (K_c) são determinados experimentalmente para cada cultura. Assim, valores de ET_c podem ser obtidos pela eq. (2), ou seja, pela multiplicação da ET_0 pelo fator de correção ou ajuste da cultura específica, o K_c (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990; ALLEN et al., 1998):

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (2)$$

onde ET_c é a evapotranspiração do cultivo (lâmina tempo⁻¹), ET_0 é a evapotranspiração de referência (lâmina tempo⁻¹) e K_c é o coeficiente de cultivo, o qual é adimensional.

2.1.2.5.3 Evapotranspiração do cultivo sob condição não padrão ($ET_{c\ aj}$)

A evapotranspiração do cultivo sob condição não padrão ($ET_{c\ aj}$) se refere a 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 ET_c 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 ET_c (ALLEN et al., 1998).

2.1.2.6 O coeficiente de cultivo (K_c)

A ET_c pode ser medida de diferentes maneiras. No entanto, a sua medição é difícil e onerosa, de tal forma que estimativas obtidas a partir da metodologia de duas fases, a qual está disposta em Allen et al. (1998) e representada na eq. (2), é preferível e tem sido amplamente aceita e adotada (FARAHANI et al., 2007; LASCANO, 2007).

Nesse contexto, informações sobre as condições ambientais e sobre a cultura devem ser levadas em consideração para obter estimativas acuradas da evapotranspiração para a referida cultura, pois as condições meteorológicas determinam a demanda atmosférica, enquanto o dossel vegetativo e as condições de umidade do solo determinam até que ponto esta demanda será atendida (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990).

Portanto, conforme Allen et al. (1998), o K_c pode ser determinado experimentalmente pelo processo inverso, onde se estima a ET_0 pelo método de Penman-Monteith e a ET_c é medida por alguma metodologia, como por exemplo, a lisimetria de pesagem. Desta forma, o mesmo poderá ser determinado por meio da eq. (3):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

sendo K_c o coeficiente de cultivo (adimensional), ET_c a evapotranspiração do cultivo sob condição padrão (lâmina tempo⁻¹) e ET_0 a evapotranspiração de referência (lâmina tempo⁻¹).

Assim, na ocasião da estimativa da ET_c , a maioria dos efeitos dos diferentes fatores meteorológicos se encontra incorporada na estimativa do valor de ET_0 , enquanto o valor de K_c varia principalmente em função das características do cultivo e, segundo Jensen, Burman e Allen (1990), representa a habilidade da planta e do solo em atender a demanda imposta. Para Allen et al. (1998), isso permite a transferência de valores de K_c entre distintas regiões geográficas e climas, e, desta forma, constitui a principal razão para a aceitação e utilização da metodologia do K_c , bem como dos valores de K_c que são determinados nos experimentos.

Portanto, o conceito de K_c incorpora o efeito integrado de quatro características principais que diferenciam o cultivo em questão do cultivo de referência (grama), sendo elas a

altura do cultivo, o albedo, a resistência do cultivo e a evaporação do solo (ALLEN et al., 1998). Em outras palavras, Allen et al. (2005) considera que esta diferenciação se dá pela rugosidade aerodinâmica da cultura, resistência do dossel vegetativo e do solo ao fluxo de calor e vapor d'água e, por fim, a refletância do conjunto dossel vegetativo e solo à radiação de ondas curtas.

O valor de K_c permite prever apenas os valores de ET_c . Este valor representa o limite máximo de evapotranspiração esperada para o cultivo quando não existem obstáculos ao crescimento do mesmo devido a limitações de água, densidade de cultivo, doenças, pragas, plantas daninhas ou excessiva salinidade. Assim, quando as condições do cultivo não forem semelhantes àsquelas indicadas para a condição padrão, o valor de ET_c deve ser ajustado para a condição não padrão, $ET_{c\ aj}$ (ALLEN et al., 1998).

2.1.2.7 Importância e uso da evapotranspiração

Conhecer a evapotranspiração dos cultivos é de suma importância para diversas aplicações, como por exemplo, na irrigação, em estudos de zoneamento agrícola e definição das melhores épocas de semeadura, previsão de safras e em estudos hidrológicos em geral.

Conforme Jensen, Burman e Allen (1990) e Allen et al. (2007), a evapotranspiração constitui-se no principal requerimento hídrico das culturas agrícolas. Segundo estes autores, a sua quantificação é necessária para diversas aplicações na irrigação, dentre elas: projetar e dimensionar os componentes dos sistemas de irrigação; operar sistemas de irrigação e de abastecimento; realizar balanços hídricos e análises hidrológicas.

Em estudos de zoneamento agrícola e definição das melhores épocas de semeadura, o conhecimento da evapotranspiração também é importante quando estes definem como critério o risco de ocorrência de deficiência hídrica. Nesses estudos, conforme demonstram Cunha et al. (2001a, b), faz-se o uso do Índice de Satisfação das Necessidade de Água (ISNA), o qual representa a razão entre a evapotranspiração real e a potencial da cultura. Assim, para delimitar quais são as regiões mais favoráveis para o cultivo e quais as melhores épocas de semeadura, leva-se em consideração as situações onde o ISNA é maior.

Conforme demonstram Assad et al. (2007), nos estudos de previsão de safras a evapotranspiração também é um componente importante, pois a mesma se faz necessária para

promover a estimativa da produtividade em função da deficiência hídrica relativa (razão entre a evapotranspiração real e a potencial da cultura).

No campo da hidrologia, a evapotranspiração é importante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, nos estudos de caracterização de bacias hidrográficas, na avaliação dos impactos da mudança do uso da terra sobre os componentes do ciclo hidrológico, e consequentemente sobre os aspectos quantitativos e qualitativos da água, bem como na definição da legislação que trata dos recursos hídricos e na concessão de outorgas de uso da água (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990).

2.1.3 Lisimetria de pesagem no estudo da evapotranspiração

2.1.3.1 Histórico da lisimetria

A história da lisimetria compreende um período superior a 300 anos. O termo lisímetro foi derivado do grego “*lysis*”, dissolução ou movimentação, e “*metron*”, mensuração. Portanto, este termo foi inicialmente concebido para definir equipamentos utilizados para estudar a velocidade, a quantidade e a composição da água oriunda da percolação ao longo de um meio poroso (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982).

Porém, com o passar do tempo, os lisímetros começaram a ser utilizados também com o objetivo de estudar o processo de evapotranspiração. Desta forma, acredita-se que Thornthwaite et al. (1946 apud GREBET; CUENCA, 1991) foram os primeiros a utilizar lisímetros para esta finalidade. No entanto, Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982) ressaltam que a utilização dos lisímetros nestes estudos somente avançou intensamente a partir da década 60. Howell (2004) considera que esse progresso deveu-se ao aumento do conhecimento da física do solo relacionada ao fluxo de água, hidráulica do solo e processos térmicos, além da dinâmica de absorção de água pelas raízes e, também, das influências micrometeorológicas devidas a advecção e outros processos aerodinâmicos. Mesmo com pouco tempo, a lisimetria avançou muito no estudo da evapotranspiração, de tal forma que atualmente os lisímetros do tipo pesagem são amplamente aceitos como metodologia padrão, a qual deve ser utilizada como referência para comparar e validar outros métodos e modelos de estimativa da evapotranspiração (FARAHANI et al., 2007; BRYLA; TROUT; AYARS, 2010).

2.1.3.2 Definição

Para Howell (2004), os lisímetros são equipamentos, normalmente tanques, que delimitam um determinado volume de solo e permitem mensurar o balanço de água no solo ou o volume de água que é percolado verticalmente e/ou sua qualidade.

Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982) afirmam reconhecer a grande versatilidade dos lisímetros e optam por não apresentar uma definição rigorosa que possa abranger todas as possíveis formas de utilização dos mesmos. Assim, estes autores preferem definir somente os lisímetros que são utilizados para estudos de evapotranspiração, os quais segundo estes são *“grandes recipientes preenchidos com solo (ou envolvendo uma massa de solo), localizados no campo para representar este ambiente, apresentando solo nu ou vegetado (cultura ou grama), onde é possível determinar a evapotranspiração da cultura que ali cresce, da vegetação de referência (grama) ou a evaporação do solo nu”*.

2.1.3.3 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), mistos (mecânico combinado com eletrônico) e até sistemas hidráulicos (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; HOWELL, 2004).

No presente estudo foram utilizados lisímetros de pesagem eletrônica, baseados na utilização de células de carga que suportam diretamente todo o peso do tanque. Desta forma, nesta revisão será dada ênfase aos lisímetros de pesagem dos sistemas mistos e eletrônicos. Algumas fontes disponíveis na literatura possuem uma revisão ampla sobre lisimetria que podem ser consultadas, destacando-se: Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982), Allen et al. (1991) e Howell, 2004.

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.

2.1.3.4 Balanço hídrico no lisímetro de pesagem

Considerando-se que o lisímetro de pesagem constitui-se de um bloco de solo isolado hidrológicamente, é possível estudar no mesmo os vários componentes de entrada e saída do balanço hídrico (ABOUKHALED, ALFARO, SMITH, 1982; ALLEN et al., 1998; HOWELL, 2004).

Assim, segundo Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982), o balanço hídrico do solo do lisímetro fica descrito como na eq. (4):

$$P + I \pm ES = ET + D \pm \Delta A \quad (4)$$

onde P é a precipitação, I a irrigação, ES o escoamento superficial, ET a evapotranspiração, D a drenagem e ΔA a variação do armazenamento de água, sendo todas as unidades apresentadas em mm. Normalmente os lisímetros de pesagem são confeccionados com a borda superior ligeiramente elevada, pois assim a ocorrência de escoamento superficial para dentro ou para fora do lisímetro é evitada e seu valor no balanço hídrico é considerado nulo.

Portanto, a evapotranspiração pode ser determinada isolando-se o seu termo na eq. (4), conforme apresentado na eq. (5):

$$ET = P + I - D \pm \Delta A \quad (5)$$

Geralmente os termos precipitação e irrigação são determinados paralelamente utilizando outros métodos, como por exemplo, pluviômetros. Por outro lado, na ocasião em que é feita a abertura dos registros do sistema de drenagem, o termo drenagem pode ser determinado com base na variação de massa acusada pelo próprio lisímetro. Assim, se em um determinado intervalo de tempo (dia ou hora, por exemplo) não ocorrer precipitação, irrigação e drenagem, a evapotranspiração a ser determinada pelo lisímetro será igual a sua própria variação de massa. No caso da ocorrência de um ou mais desses outros termos, os mesmos devem ser descontados (HOWELL, 2004).

2.1.3.5 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).

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.

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).

2.1.3.6 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 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). 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).

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.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da área experimental

O estudo foi realizado na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (Figura 10), localizada na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em Piracicaba, São Paulo (latitude 22°41’57”S, longitude 47°38’38”O e altitude de 530 m).

A área experimental conta com 0,38 ha de cana irrigada com vinhaça por gotejamento enterrado, 0,33 ha de palmito pupunha de 10 anos de idade conduzido sem irrigação, pomar de 1 ha de lima ácida “Tahiti” de 9 anos conduzido sem irrigação e uma estação meteorológica com superfície gramada de 0,44 ha, a qual é mantida irrigada por aspersão.

A referida estação meteorológica dispõe um *datalogger* (Modelo CR23X, Marca Campbell Scientific®) para leitura dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar (Termohigrômetro, Modelo HMP45C, Marca Vaisala®), radiação solar global (Piranômetro, Modelo CMP3, Marca Kipp & Zonen®), velocidade e direção do vento (Anemômetro sônico, Modelo WindSonic 4, Marca Gill®), pressão atmosférica (Barômetro, Modelo PTB 110, Marca Vaisala®), saldo de radiação (Saldo radiômetro, Modelo NR-LITE, Marca Kipp & Zonen®) e chuva (Pluviômetro, Modelo TE525MM, Marca Texas Electronics®). A área gramada da estação meteorológica recebe roçadas frequentes e todos os sensores são submetidos à manutenção mensal ou bimestral, seguindo as recomendações dos fabricantes e aquelas constantes em ASAE (2004) e ASCE-EWRI (2005). O relatório de dados da estação meteorológica é fornecido a cada 10 min e nas escalas horária e diária. Os dados horários e diários são aferidos quanto a sua qualidade seguindo as recomendações constantes em Allen (1996). Após essa aferição, estima-se a ET_o em ambas as escalas temporais pelo método Penman-Monteith, seguindo três diferentes padronizações do método, sendo elas: ASCE-PM (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990), FAO56-PM (ALLEN et al., 1998) e ASCE-stPM (ASCE-EWRI, 2005). A estimação dos valores de ET_o é realizada usando o software REF-ET (ALLEN, 2000).

Figura 10 – Mapa da área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas localizada na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP)

Além da estação meteorológica, a área experimental conta ainda com um pivô central de 7,4 ha e 164 m de raio; barracão para máquinas, equipamentos e salas de apoio; sistema de bombeamento de água do rio para o açude; casa de bombas para irrigação localizada e pivô central; e painel controlador da irrigação localizada.

O clima na região é do tipo subtropical úmido com verão quente (Cfa), segundo a classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006). O verão é chuvoso e o inverno seco. A precipitação média anual é de 1.328 mm e a temperatura média anual de 21,6 °C, sendo a média em julho, mês mais frio, de 17 °C e a média em janeiro, mês mais quente, igual a 24,8 °C (CEPAGRI, 2011).

O solo da área experimental é classificado como Nitossolo (EMBRAPA, 2006). Em um estudo prévio determinou-se a textura do solo até a profundidade de 1,2 m. Para isso, quatro trincheiras foram abertas de maneira distribuída pela área. Em cada trincheira coletou-se

nas camadas de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm, uma amostra deformada de, aproximadamente, 300 g de solo. Estas amostras foram levadas ao laboratório e lá tiveram a sua textura determinada pelo método do densímetro, conforme descrito em Bouyoucos (1962). Com base no triângulo textural de Lemos e Santos (1996) e na análise dos dados granulométricos do solo da área experimental (ANEXO A), o solo é bastante homogêneo ao longo do seu perfil, podendo ser classificado como de textura argilosa para a camada de 0-40 cm de profundidade (em média 52,9% de argila), enquanto que na camada de 40-120 cm é classificado como de textura muito argilosa (em média 61,9% de argila).

2.2.2 Planejamento inicial dos lisímetros

2.2.2.1 Escolha da metodologia

Conforme demonstrado anteriormente, diversas aplicações demandam informações sobre o consumo hídrico do pinhão-mansão cultivado com e sem irrigação. Visando subsidiar estas aplicações, definiu-se como meta neste estudo a construção de lisímetros de pesagem direta com capacidade para determinar, com boa acurácia e resolução, a evapotranspiração do pinhão-mansão, nas escalas horária e diária. Além disso, esperava-se que as medidas obtidas por estes lisímetros fossem minimamente influenciadas pela ocorrência de fatores externos, como a temperatura e o vento.

A opção pela construção de lisímetros de pesagem, ao invés de outras metodologias, deveu-se ao fato desses equipamentos serem considerados como a melhor tecnologia disponível para determinar a evapotranspiração das culturas (FARAHANI et al., 2007; BRYLA; TROUT; AYARS, 2010) e, portanto, possivelmente atenderia as expectativas do estudo. Dentro da lisimetria de pesagem, optou-se pela construção de lisímetros de pesagem direta, pois em tomadas de preço preliminares constatou-se que este sistema custaria 65% menos em relação ao sistema com redução de massa, fato que reduziu bastante o custo total dos lisímetros. Somado a isso, o sistema de pesagem direta é mais simples na sua concepção e as células de carga são facilmente disponíveis no mercado, diferentemente do sistema de redução de massa, o qual é feito mediante encomenda e poucas empresas se dispõem a produzi-lo.

2.2.2.2 Locação dos lisímetros e o tamanho da área experimental

Foram selecionadas na área experimental três áreas para o estudo (Figura 10). Nestas áreas será cultivado o pinhão-mansão irrigado por pivô central (1 ha), gotejamento (0,5 ha) e sem irrigação (0,5 ha). Os lisímetros foram locados aproximadamente no centro de cada área. Essa medida foi adotada para tentar minimizar os efeitos negativos da ocorrência de energia advectiva nos lisímetros, a qual pode incrementar a evapotranspiração das plantas nos mesmos, devido ao chamado “efeito oásis” (ALLEN; PRUITT; JENSEN, 1991; PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

Embora se tenha buscado centralizar os lisímetros, ressalta-se que a área destinada a cada tratamento pode ser considerada pequena e os dados de evapotranspiração a serem obtidos deverão ser futuramente analisados com cuidado, a fim de avaliar quanto à possibilidade de ocorrência do “efeito oásis”. Segundo Allen, Pruitt e Jensen (1991), normalmente, são necessárias áreas maiores que 4 ha para garantir uma adequada bordadura. Nesse mesmo contexto, Allen et al. (2011) consideram que um lisímetro para ser representativo das condições que se deseja medir, necessita estar situado a pelo menos 50 m das bordas de uma grande área cultivada com a mesma cultura e submetida ao mesmo manejo. No caso dos lisímetros construídos neste estudo, os do tratamento irrigado por pivô central foram instalados com no mínimo 38 m de distância da borda mais próxima, os do tratamento irrigado por gotejamento a 13 m e os do tratamento sem irrigação a 19 m.

Ressalta-se que, embora grandes áreas sejam desejáveis, a disponibilidade destas e de recursos financeiros e humanos para subsidiar a sua manutenção, é quase sempre impraticável. Isso faz com que áreas de bordadura ideais dificilmente sejam adotadas. Além disso, conforme mencionado anteriormente, Piracicaba é caracterizada por clima subtropical úmido com verão quente (Cfa), apresentando precipitação média anual de 1.328 mm. Nestas condições climáticas, a maior influência na evapotranspiração das plantas é devida à radiação solar incidente. Os outros fatores climáticos (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) apresentam menor contribuição e, portanto, a importância da advecção nessas condições climáticas é pequena.

2.2.2.3 Formato e dimensões dos lisímetros

Analisando-se os experimentos e lavouras de pinhão-mansó recentemente implantadas no Brasil, normalmente tem sido empregado o espaçamento de plantio de 3 x 2 m (6 m²), 3 x 3 m (9 m²), 4 x 2 m (8 m²) ou 4 x 3 m (12 m²). Sendo assim, optou-se por adotar o espaçamento 4 x 3 m (12 m²), pois, como dois dos três tratamentos serão irrigados, espera-se que o crescimento das plantas seja vigoroso e, desta forma, um espaçamento maior permitirá que haja menos competição entre as plantas devido a maior área disponível para cada.

Conforme Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982), Allen, Pruitt e Jensen (1991), Howell (2004) e Allen et al. (2011), os lisímetros devem ser projetados de forma a apresentar sua área útil semelhante àquela destinada à cultura. Segundo estes autores, isso possibilita a determinação mais fiel da evapotranspiração real, pois a área de solo disponível para evaporação é semelhante àquela que a cultura dispõe. Além disso, é minimizada a probabilidade do dossel foliar extrapolar a área do lisímetro (“efeito buquê”), fato que aumenta a área de captação de radiação para a transpiração e pode gerar medidas inflacionadas de evapotranspiração.

Assim, para o espaçamento 4 x 3 m, que apresenta 12 m² para cada planta, os tanques dos lisímetros foram projetados com 1,955 m de raio interno (os mesmos 12 m²). A opção pelo lisímetro circular, ao invés de retangular, deveu-se ao fato deste ter menor custo, devido a menor quantidade de material necessário para a sua produção, além de os tanques circulares serem inerentemente mais fortes por unidade de espessura da parede quando comparado aos retangulares ou quadrados (HOWELL, 2004).

Outro requerimento básico ao se projetar um lisímetro consiste de que o mesmo deve apresentar profundidade suficiente para não limitar o crescimento radicular da cultura (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982; ALLEN; PRUITT; JENSEN, 1991; HOWELL, 2004; ALLEN et al., 2011). Assim, como é esperado que o pinhão-mansó tenha sistema radicular profundo, tendo em vista as características de tolerância à seca que são fomentadas na literatura, aliado ao fato de ser uma planta perene, os lisímetros neste estudo foram inicialmente planejados para serem construídos com 2 m de profundidade útil de solo.

Porém, um lisímetro com a referida profundidade de solo e 12 m² de área de superfície deveria apresentar massa total em torno de 53.000 kg. Um lisímetro com essas dimensões teria custo muito elevado, além de que representaria uma grande quantidade de

“massa morta” a ser avaliada pelo sistema de pesagem, o qual precisa detectar com satisfatória acurácia variações de massa da ordem de poucos quilogramas. Desta forma, optou-se por construir lisímetros menos profundos, com 1,3 m de profundidade útil de solo. No entanto, acredita-se que os lisímetros apresentarão profundidade suficiente para não limitar o crescimento radicular das plantas, pelo menos durante os 7 ou 8 anos iniciais.

2.2.2.4 Número de repetições

Considerando que o pinhão-manso é uma planta perene de grande porte, é impraticável construir um lisímetro para comportar mais de uma planta em cada tratamento. Por esse motivo, foram instalados seis lisímetros, dois por tratamento, devido à necessidade de repetição. Assim, como cada lisímetro terá uma planta, a evapotranspiração em cada tratamento será oriunda da média de duas plantas, fato que ajudará a minimizar erros decorrentes das plantas que são amostradas. Além disso, no caso de alguma falha de dados de um lisímetro, o seu par poderá cobrir este problema.

2.2.3 Construção dos lisímetros

2.2.3.1 Escavação e nivelamento

A construção dos lisímetros iniciou-se com a escavação do solo, sendo este procedimento dividido em duas etapas, a primeira manual (Figura 11) e a segunda com máquina retroescavadeira (Figura 12).

Na etapa manual trabalharam três a quatro homens. Nesta etapa realizou-se a escavação do solo com ligeira folga no local onde seriam instalados os lisímetros. Assim, o solo escavado no fosso de cada lisímetro foi de 5 m de diâmetro e 1,3 m de profundidade (25,5 m³). Na escavação, considerando-se a homogeneidade do solo observada no ANEXO A, dividiu-se o solo em quatro camadas: 0-20; 20-40; 40-60 e 60-130 cm. À medida que essas camadas foram escavadas, o solo retirado era disposto ao lado em montes separados, de tal forma que depois pudessem ser devolvidos ao tanque dos lisímetros na mesma sequência durante o processo de reconstrução do solo.

Figura 11 – Início da escavação manual do solo para a construção dos lisímetros (A) e fosso já escavado e camadas de solo sendo reservadas durante a escavação (B)

Após a escavação manual iniciou-se a escavação com máquina retroescavadeira. Este procedimento teve como objetivo aumentar a profundidade do fosso dos lisímetros para próximo de 3 m. Além disso, a máquina retroescavadeira também abriu o fosso onde seria construída a porta de acesso e o túnel de interligação entre os dois lisímetros de um mesmo tratamento. Todo o solo retirado pela retroescavadeira foi armazenado ao lado, para que depois fosse possível reutilizá-lo em pequenas correções no terreno de fora dos lisímetros. Após isso, todo o solo restante foi retirado da área experimental.

Figura 12 – Retroescavadeira aumentando a profundidade do fosso dos lisímetros para próximo de 3 m (A) e momento da abertura do fosso para a porta de acesso e o túnel de interligação dos lisímetros (B)

Após a completa escavação do solo, uma mini-carregadeira foi utilizada para abrir uma rampa de acesso ao fundo da escavação e, em seguida, promover o seu nivelamento (Figura 13).

Figura 13 – Fosso totalmente aberto e nivelado para construção dos lisímetros de um tratamento

2.2.3.2 Alvenaria

Para a construção da alvenaria dos lisímetros foram contratados um engenheiro civil e uma construtora (Construtora Sorrila Ltda.).

Os lisímetros de cada tratamento foram construídos em pares, sendo estes acessados a partir do mesmo fosso de entrada e interligados por um túnel interno (Figura 14). A construção foi realizada de maneira a permitir a amostragem de plantas de diferentes linhas de plantio. Considerando-se que existem 8 m de distância entre o centro de um lisímetro e o do outro, isso permitirá que uma linha de plantio seja cultivada entre as duas plantas pertencentes às outras linhas que serão monitoradas pelos lisímetros.

A construção das paredes foi realizada com estrutura reticulada utilizando blocos pré-moldados de concreto estrutural com valor de resistência a compressão de 4,5 MPa. Ao longo das paredes foram distribuídos pilares e canaletas horizontais de graute (um microconcreto de grande fluidez) envolvendo barras de aço. Na parte superior do fosso dos

lisímetros foi construída uma cinta de concreto com 30 cm de altura e 10 cm de espessura. Esta cinta teve como objetivo reduzir a quantidade de alvenaria exposta para fora do solo, pois, conforme Allen, Pruitt e Jensen (1991), os lisímetros devem ser construídos da maneira mais imperceptível possível para não tornar muito artificial o ambiente onde as plantas crescem. A laje do túnel de interligação foi construída utilizando lajes pré-moldadas de concreto e reforçadas com caixas de concreto. Toda a parte interna das paredes foi rebocada após a sua construção e nenhuma pintura foi realizada.

No fosso de cada lisímetro foram construídas, em disposição triangular e de modo equidistante, três colunas de sustentação de 40 x 40 cm de base, anexadas por colunas laterais auxiliares de 40 x 20 cm de base. As colunas de sustentação foram planejadas para suportar permanentemente os lisímetros, enquanto as auxiliares para a ocasião de ser necessário apoiar um macaco hidráulico para erguer os tanques dos lisímetros. Ambas as colunas foram construídas para suportarem com folga o peso total. Para isso, utilizou-se os mesmos blocos de concreto usados na confecção das paredes. Porém, a estrutura das colunas foi inteiramente grauteada e amarrada internamente por barras de aço. Além das colunas de sustentação e auxiliar, uma terceira coluna (coluna de união) foi construída para promover a união entre as colunas de sustentação e auxiliar com a parede do fosso. Por fim, todas as colunas foram alicerçadas por sapatas de 1 x 1 m e 30 cm de profundidade, as quais foram confeccionadas em estrutura de concreto armado.

A altura das colunas de sustentação variou em função da declividade natural na superfície do solo e da altura das células de carga utilizadas. Mesmo assim, todas as colunas de sustentação foram dimensionadas de forma a permitir que os tanques dos lisímetros ficassem ligeiramente acima da superfície do solo e que as colunas estivessem niveladas entre si, visando assegurar a adequada distribuição do peso total dos lisímetros entre as três. As colunas auxiliares, bem como as colunas de união, foram construídas 20 cm mais baixas que as de sustentação.

A abertura do fosso de entrada foi construída com 1 x 1 m e na mesma foi instalada uma escada de acesso e uma porta metálica de folha dupla com cadeado. Com isso, o acesso aos lisímetros é restrito e os equipamentos instalados no seu interior ficam mais seguros. Ainda, a porta do fosso ajuda a evitar a entrada de animais, poeira, água da chuva e vento.

O espaço vazio que se formou na parte de fora dos lisímetros, depois de finalizada a construção da alvenaria, foi preenchido com seixo até aproximadamente 1 m da

superfície do solo. O restante foi preenchido com solo retirado durante a escavação realizada com a retroescavadeira. A utilização do seixo deveu-se ao fato deste facilitar a drenagem da água na face externa da parede de alvenaria, o que diminui muito os problemas de umedecimento da parede e infiltração.

Na construção da alvenaria priorizou-se facilitar a mobilidade de pessoas no seu interior, pois esta é sempre bastante requerida no dia-a-dia, por exemplo, para a coleta de dados, abertura dos registros de drenagem, manutenção dos lisímetros e troca de células de carga danificadas. Desta forma, o túnel de interligação foi construído com 1 m de largura e 2 m de altura. Além disso, a altura das colunas de sustentação foi sempre dimensionada para permitir o acesso de pessoas embaixo dos tanques com o mínimo de comodidade.

O piso da construção dos lisímetros foi deixado com solo original, apenas tendo sido recoberto por uma camada de, aproximadamente, 10 cm de seixo. Isso foi realizado para ajudar na drenagem da água no interior da construção, principalmente na ocasião da abertura dos registros de drenagem dos lisímetros.

Todos os lisímetros receberam infraestrutura elétrica com aterramento, dispondo de tomadas de 110 e 220 V de tensão, além de lâmpadas no túnel e abaixo dos tanques dos lisímetros. Porém, os mesmos não foram supridos de nenhuma infraestrutura hidráulica por entender que a mesma não era necessária.

Resumidamente, as etapas da construção da alvenaria dos lisímetros procederam conforme a sequência apresentada na Figura 14. Primeiro, promoveu-se a marcação dos pontos da construção (Figura 14A). Depois, iniciou-se a construção da primeira fileira de blocos (Figura 14B e F). Após foram construídas as sapatas das colunas de sustentação, auxiliar e de união (Figura 14C-F). Em seguida, continuou-se o processo de levantamento das paredes e construção das colunas (Figura 14G). Ainda nesta figura pode-se notar a construção da laje do túnel de interligação. Depois foi realizada a construção do fosso de acesso e das cintas de concreto nas bordas superiores dos fossos dos lisímetros (Figura 14H e I). Na Figura 14J apresenta-se a vista interna da construção após seu final, enquanto a Figura 14K apresenta a mesma vista, porém com o fundo já preenchido com seixo. Após a construção da alvenaria uma mini-carregadeira foi utilizada para promover o nivelamento do terreno fora dos lisímetros, de tal forma que a borda destes se encontrasse ligeiramente acima da superfície do solo. Assim, a Figura 14L apresenta uma vista externa dos lisímetros após a sua construção completa.

Figura 14 – Etapas da construção da alvenaria dos lisímetros. Marcação dos pontos da construção (A), construção da primeira fileira de blocos (B), sapata para coluna de sustentação, auxiliar e de união (C, D e E), primeira fileira de blocos e sapatas já construídas (F), fase intermediária da construção com as paredes parcialmente levantadas e sendo construída a laje do túnel de interligação, bem como as colunas de sustentação, auxiliar e de união (G), vista externa do fosso de acesso e das cintas de concreto (H e I), vista interna da construção (J), disposição do seixo no fundo (K) e vista dos lisímetros após a sua construção completa (L)

Figura 14 – Etapas da construção da alvenaria dos lisímetros. Marcação dos pontos da construção (A), construção da primeira fileira de blocos (B), sapata para coluna de sustentação, auxiliar e de união (C, D e E), primeira fileira de blocos e sapatas já construídas (F), fase intermediária da construção com as paredes parcialmente levantadas e sendo construída a laje do túnel de interligação, bem como as colunas de sustentação, auxiliar e de união (G), vista externa do fosso de acesso e das cintas de concreto (H e I), vista interna da construção (J), disposição do seixo no fundo (K) e vista dos lisímetros após a sua construção completa (L)

2.2.3.3 Construção, transporte e instalação dos tanques lisimétricos

A empresa Procind Mecânica e Instalações Industriais®, de Piracicaba-SP, foi contratada para construir os tanques dos lisímetros (Figura 15). Estes foram construídos em aço carbono tipo 1020 e receberam duas mãos de pintura com resina epóxi naval na cor cinza. Cada tanque apresentou peso total aproximado de 1.700 kg.

Os tanques apresentam uma parte cilíndrica de 1,35 m de altura e 1,955 m de raio interno (12 m^2 de área e $16,2 \text{ m}^3$ de volume). Esta parte cilíndrica foi confeccionada utilizando chapas de $\frac{3}{16}$ " de espessura. Dois reforços de 1" com $\frac{1}{2}$ " de espessura foram soldados voltados para dentro do tanque, sendo que o primeiro foi soldado a 15 cm da borda elevada do cilindro e o outro a 65 cm. Esses reforços foram utilizados para ajudar a estrutura do tanque a resistir ao abaulamento lateral. Além disso, os reforços também atuam auxiliando no impedimento da formação de caminhos preferenciais para o fluxo de água durante a infiltração no solo, pois a água pode apresentar uma tendência de infiltrar mais facilmente junto às paredes do tanque. Assim, a presença dos reforços promove a quebra da continuidade da infiltração, fazendo com que a água tenha que se movimentar em direção ao centro do tanque.

Abaixo desta parte cilíndrica foi disposto um fundo cônico de 50 cm de altura e que também utiliza chapas de $\frac{3}{16}$ ". Este fundo cônico foi instalado para estabelecer inclinação suficiente para conduzir a água que atravessa o perfil do solo em direção ao centro do fundo do tanque. Ali se encontra um exutório por onde sai a água da drenagem e que é composto por um ralo e uma luva de 2". O fundo cônico foi reforçado soldando-se na sua parte interna nove perfis laminados do tipo U de 4" de altura e 1ª alma. Visando melhorar o reforço no fundo do tanque, na parte de baixo também foram soldados dois anéis concêntricos de $\frac{1}{2}$ " de espessura. Os anéis foram dispostos aproximadamente no centro de massa do tanque, com o ponto médio entre estes localizado a 1,39 m de distância do centro do fundo cônico. Nesses anéis e no fundo do tanque foram soldados dois varões de $\frac{5}{8}$ " de diâmetro para servirem de suporte para os reservatórios de água do sistema de drenagem. Por fim, na parte interna do tanque foram soldadas três chapas com olhal que serviam como ponto de suporte para içar o tanque.

Três chapas de apoio de 1 e $\frac{1}{4}$ " de espessura foram instaladas em disposição triangular no fundo do tanque e paralelas ao plano horizontal. Essas chapas foram projetadas para serem o ponto de apoio das células de carga no tanque. As chapas apresentam 30 x 35 cm,

medidas essas suficientes para fazer com que as mesmas fossem soldadas ligando os anéis concêntricos localizados abaixo do fundo cônico. Além disso, visando reforçar estes apoios, pedaços de chapa da mesma espessura foram soldadas ligando as chapas de apoio aos anéis concêntricos. Por fim, as chapas de apoio foram preparadas com roscas para quatro parafusos de 1". Estes parafusos foram projetados para suportar o peso do lisímetro, fato que o torna útil no caso de alguma manutenção ou troca de célula de carga, onde não se faz necessário calçar os tanques, pois os parafusos podem funcionar como calços.

Figura 15 – Vista lateral do tanque lisimétrico (A e B), fundo cônico já construído (C) e vista interna com detalhe do exutório (D)

O transporte dos tanques da indústria até a área experimental foi realizado em duas viagens, sendo transportados três tanques em cada uma. Para o transporte dos mesmos foi necessário utilizar um caminhão munck (Figura 16A) e um caminhão prancha (Figura 16B), gentilmente emprestado pela Secretaria Municipal de Agricultura e Abastecimento de Piracicaba.

Como o trajeto desde a indústria até a área experimental envolvia o cruzamento do perímetro urbano de Piracicaba (Figura 16C), foi necessário o acompanhamento de batedores da Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes de Piracicaba.

Figura 16 – Caminhão munck (A) e caminhão prancha (B) utilizados para o transporte dos tanques lisimétricos e momento do transporte sendo realizado na ponte sobre o Rio Piracicaba (C)

Para a instalação dos tanques lisimétricos utilizou-se apenas um caminhão munck. Primeiramente foram colocados os parafusos de suporte nas respectivas roscas previamente preparadas nas chapas de apoio (Figura 17A). Em seguida a pintura foi retocada

(Figura 17B). Com os tanques devidamente preparados, os mesmos foram baixados pela lança do caminhão munck (Figura 17C) até baixá-los completamente, ocasião em que os parafusos se encontravam alinhados com as colunas de sustentação da alvenaria (Figura 17D).

Figura 17 – Momento da instalação do tanque do lisímetro, sendo os parafusos de suporte colocados na rosca da chapa de apoio (A), retoque da pintura (B), alinhamento e descida do tanque usando o caminhão munck (C) e vista do tanque completamente baixado e alinhado com as colunas de sustentação da alvenaria (D)

2.2.3.4 Sistema de drenagem

Conforme explicado na eq. (5), a drenagem é um dos componentes do balanço hídrico que deve ser conhecido para permitir a determinação da evapotranspiração utilizando lisímetros de pesagem. Assim, no presente estudo optou-se por desenvolver um sistema de drenagem capaz de armazenar a água percolada pelo perfil do solo. Nesse sistema a água percolada continua sendo pesada pelos lisímetros e permite que o volume total de água drenado em um dado período de tempo seja determinado pela variação de massa do lisímetro após a

abertura do registro. Além disso, este sistema permite que a água percolada não saia do sistema durante períodos em que ocorre evapotranspiração, fato que implicaria em dificuldades para interpretar os dados e definir se a perda de massa é devida a evapotranspiração ou drenagem.

O sistema de drenagem de cada lisímetro foi confeccionado com dois reservatórios de PVC de 300 mm de diâmetro interno x 2,8 m de comprimento, quatro tampões feitos de PVC e fibra de vidro, dois suspiros (um em cada reservatório), mangueira flexível, conexões, registro e cintas abraçadeiras metálicas (Figura 18).

Figura 18 – Sistema de drenagem dos lisímetros

Basicamente, os reservatórios de drenagem tem capacidade aproximada de 198 L cada. Portanto, cada lisímetro possui capacidade total de armazenamento de 396 L, o que equivale a 33 mm em termos de lâmina d'água. Estes reservatórios são fechados pelos tampões nas extremidades e ambos são mantidos fixados ao tanque do lisímetro, utilizando as abraçadeiras metálicas que os unem aos varões de suporte soldados no tanque. Desta forma, toda a estrutura do sistema de drenagem é continuamente pesada junto com o tanque lisimétrico.

A água que é drenada pelo exutório do fundo cônico do tanque é conduzida para dentro dos dois reservatórios de drenagem por meio de um jogo de conexões que os interliga

em um sistema de vasos comunicantes, pois o registro do sistema de drenagem é mantido fechado. Na interligação entre os reservatórios foram utilizados pedaços de mangueira flexível para conferir maior flexibilidade ao sistema e, desta forma, minimizar o risco de ruptura das demais conexões.

Em cada reservatório existe ainda um suspiro localizado na sua parte superior, o qual atua como facilitador do enchimento e esvaziamento dos reservatórios, pois permite a entrada e saída de ar no sistema. Além disso, no caso de haver excesso de água nos reservatórios devido à falta de manejo dos lisímetros no que concerne a abertura periódica dos registros, os suspiros atuam como dreno auxiliar para o excesso de água não colapsar o sistema. No entanto, cabe ressaltar que sob essas condições ocorrem perdas de massa devidas à drenagem. Assim, na ocasião da utilização dos lisímetros para monitorar as plantas de pinhão-mansão, será necessário cuidado para evitar tais eventos, pois estas perdas devidas à drenagem certamente serão confundidas com perdas de massa relacionadas à evapotranspiração das plantas.

2.2.3.5 Sistema de aquisição de dados e sua programação

Os lisímetros de cada tratamento dispõem de um *datalogger* para a coleta e armazenamento dos dados da marca Campbell Scientific[®], modelo CR1000. Este é mantido dentro de uma caixa selada instalada na parede do túnel de interligação. O mesmo possui, entre outras características, um termopar interno para medidas de temperatura, oito canais analógicos diferenciais e três portas de excitação.

O *datalogger* é alimentado por uma bateria de 12 V, que, por sua vez, é alimentada por uma fonte conectada à rede elétrica. Os dados são armazenados na memória interna de 4 MB do *datalogger* e em uma memória extra de 2 GB, a qual fica conectada ao *datalogger* e pode ser frequentemente retirada para descarregar os dados em um computador usando um adaptador USB.

O *datalogger* foi programado para permitir a realização do teste das células de carga em laboratório, a calibração dos lisímetros no campo e os testes dos lisímetros quanto a sua sensibilidade a temperatura e vento (ANEXO B). O programa foi elaborado em CRBasic usando o software LoggerNet 3.1, também produzido pela empresa Campbell Scientific[®]. Basicamente, o programa realiza leituras a cada 2 s da voltagem da bateria interna do *datalogger* e sua

temperatura. Além disso, faz a leitura da temperatura e a umidade relativa do ar determinada por um termohigrômetro, modelo HMP45C, marca Vaisala®. Por fim, lê as células de carga dos lisímetros usando a instrução *Full Bridge* de quatro fios e a instrução para realização de duas medidas consecutivas com reversão de polaridade.

A saída de dados foi programada para ser realizada a cada um e dez minutos, com a voltagem mínima da bateria, média da temperatura do *datalogger*, média da temperatura e umidade relativa do ar, determinada pelo termohigrômetro, e média e desvio padrão do sinal de cada célula de carga, bem como da média das três células de carga de cada lisímetro. Desta forma, considerando-se o intervalo de leitura (2 s) e os intervalos de saída, no caso da saída a cada minuto, 30 leituras são utilizadas na sua composição, enquanto, no caso da saída a cada dez minutos, 300 leituras são utilizadas.

2.2.3.6 Sistema de pesagem e cálculos preliminares

Os lisímetros foram confeccionados com sistema de pesagem direta, o qual se baseia na utilização de células de carga que suportam diretamente todo o peso. Assim, considerando que depois de construídos os lisímetros deveriam apresentar em torno de 28.500 kg (tanque preenchido, planta, água e sistema de drenagem), para cada um foram utilizadas três células de carga com capacidade nominal de 10.000 kg, as quais, quando combinadas, resultaram em capacidade total de 30.000 kg.

Em cada tratamento os lisímetros foram confeccionados com células de carga diferentes, para permitir a avaliação da sua influência nas medidas de evapotranspiração. Desta forma, um lisímetro foi confeccionado utilizando células de carga da marca ALFA INSTRUMENTOS®, ou simplesmente ALFA®, modelo M-10T e tipo *dual shear beam*, sendo esta inserida no módulo de pesagem SADEL-10CF (Figura 19A e B). O outro foi confeccionado utilizando células de carga da marca HBM®, modelo RTNC3/10T e tipo *rocker column*, associada ao suporte RTN/22T/VEN (Figura 19C e D).

Figura 19 – Vista lateral e superior da célula de carga e seu suporte da marca ALFA® (A e B, respectivamente) e HBM® (C e D, respectivamente)

As células de carga foram instaladas nos lisímetros após a instalação dos tanques lisimétricos. Inicialmente os tanques se encontravam apoiados sobre os parafusos de suporte. No entanto, para evitar o desgaste do concreto das colunas de sustentação, uma chapa de aço de 30 x 30 cm e $\frac{1}{4}$ " de espessura foi disposta entre as colunas e os parafusos. Desta forma, a instalação da célula foi realizada elevando o tanque do lisímetro com macaco hidráulico (Figura 20A), recolhendo os parafusos de suporte para dentro da rosca (Figura 20B) e, por fim, posicionando a célula de carga sobre a chapa de aço e liberando o macaco hidráulico para que o tanque vagarosamente descesse e se apoiasse na mesma (Figura 20C).

Figura 20 – Elevação do tanque lisimétrico para a instalação da célula de carga (A), recolhimento dos parafusos para dentro da rosca (B) e posicionamento da célula de carga e momento da descida do tanque (C)

Conforme as especificações técnicas das células (Tabela 2), ambas apresentam capacidade para suportar sobrecarga acima dos 10.000 kg. Na célula da ALFA[®] a máxima carga permitida, sem que haja mudanças permanentes nas especificações da célula, é de 15.000 kg, enquanto na célula da HBM[®] essa carga é de 17.000 kg. Portanto, durante o monitoramento das plantas de pinhão-manso, no caso de haver ocasionalmente alguma sobrecarga, estas deverão suportar este excesso com facilidade. No entanto, poderão ocorrer eventos onde o solo esteja bastante úmido, o sistema de drenagem cheio e a planta adulta. Nessas condições, a massa total do lisímetro poderá extrapolar os 30.000 kg, introduzindo ligeiro excesso de carga nas células. Conforme Gommola (2000), mesmo sob essas condições as células continuarão produzindo sinais de pesagem, no entanto estas medidas não são asseguradas pelas especificações técnicas das células. Assim, futuramente, caso ocorram excessos de carga nos lisímetros acima dos 30.000 kg, os dados deverão ser analisados com cautela, a fim de verificar se os mesmos são confiáveis.

Ambos os sistemas utilizados neste estudo são normalmente utilizados para pesagem de caminhões, silos e tanques. Os suportes de ambos são projetados para conferir maleabilidade ao sistema de pesagem, de tal forma que esforços laterais e desalinhamentos das forças não resultem em erros significativos, fazendo com que as células de carga estejam sempre perpendiculares ou alinhadas com a força peso. No sistema da ALFA[®] isso é conseguido por meio de articulações, enquanto no da HBM[®] usa-se uma base feita de aço galvanizado e elastômero de neoprene.

Tabela 2 – Especificações técnicas das células de carga

Especificação	ALFA [®]	HBM [®]
Capacidade nominal (kg)	10.000	10.000
Sensibilidade (mV V ⁻¹)	2 +/- 0,1%	2,85 +/- 0,1%
Erro combinado (% da saída nominal)	< 0,03	0,02
<i>Creep</i> à capacidade nominal (% da saída nominal)	20 min: < 0,02 8 horas: < 0,04	30 min: +/- 0,017
Temperatura de trabalho útil (°C)	-5 a + 60	-30 a + 80
Temperatura de trabalho compensada (°C)	0 a + 50	-10 a + 40
Efeito da temperatura (% da saída nominal °C ⁻¹)	no zero: < 0,003 na sensibilidade: < 0,001	no zero: 0,0007 na sensibilidade: 0,0008
Máxima sobrecarga sem alterações (kg)	15.000	17.000
Sobrecarga de ruptura (kg)	30.000	40.000
Excitação em corrente contínua ou alternada (V)	máxima: 20 recomendada: 10	máxima: 60 recomendada: 5
Resistência elétrica - entrada (Ω)	780 +/- 20	4.450 +/- 100
Resistência elétrica - saída (Ω)	700 +/- 2	4.010 +/- 0,5
Resistência de isolamento (GΩ)	> 5	> 20
Deflexão máxima na capacidade nominal (mm)	< 1	aprox. 0,17
Grau de proteção (IEC 529)	IP 67	IP 68

Nota: Dados obtidos junto aos fabricantes.

Conforme Evett et al. (2009), a inclinação teórica da reta de calibração de um lisímetro de pesagem pode ser estimada usando a eq. (6):

$$b = \frac{CN \times GM}{V_{fe}} \quad (6)$$

onde b é a inclinação teórica da reta (kg (mV V⁻¹)⁻¹), CN é a capacidade nominal do sistema de pesagem (kg), GM é o ganho mecânico devido ao sistema de redução de massa (adimensional) e

V_{fe} é a sensibilidade do sistema no fundo de escala, ou seja, carga total (mV V^{-1}). No caso de lisímetros de pesagem direta, CN é dada pelo somatório das capacidades individuais de cada célula, GM é igual à unidade, pois não existe ganho mecânico, e V_{fe} é dada pelo valor característico da célula, independente do número de células utilizadas.

Baseado nos dados da Tabela 2 e na eq. (6), calculou-se a inclinação teórica da reta de calibração do lisímetro. Ambos apresentaram CN de 30.000 kg. Porém, V_{fe} foi diferente. No lisímetro que utilizou células da ALFA[®] seu valor é de 2 mV V^{-1} e, portanto, o valor teórico de b igual a $15.000 (\text{kg (mV V}^{-1})^{-1})$ ou, em equivalente de lâmina d'água, $1.250 (\text{mm (mV V}^{-1})^{-1})$. Por outro lado, no lisímetro com células HBM[®] seu valor é $2,85 \text{ mV V}^{-1}$ e o valor teórico de b igual a $10.526,3 (\text{kg (mV V}^{-1})^{-1})$ ou $877,2 (\text{mm (mV V}^{-1})^{-1})$.

Segundo Gommola (2000), o erro combinado de uma célula de carga inclui os diversos erros que podem influenciar as medidas da mesma (não linearidade, histerese, temperatura e outros). Este erro é normalmente relatado como uma porcentagem da saída nominal da célula de carga, ou seja, aquela que ocorre na condição de carga máxima em mV V^{-1} . Ainda segundo este autor, o erro combinado representa a margem dentro da qual as medições determinadas ao longo de toda a faixa de utilização da célula podem variar em torno do valor real, para cima ou para baixo. Nos lisímetros que foram confeccionados com células de carga ALFA[®], devido ao erro combinado da célula de 0,03% e a sua capacidade nominal de 10.000 kg (Tabela 2), o erro máximo de leitura esperado em cada célula é de $\pm 3 \text{ kg}$. No entanto, como foram utilizadas três células de carga por lisímetro, o erro máximo esperado da massa total do lisímetro pode ser estimado conforme o método de Kline e McClintock (1953), disposto no ANEXO C. Ao utilizar três células de carga para compor o sistema de pesagem, o erro é maior do que aquele para uma única célula, porém, não aumenta linearmente com o número de células utilizadas. No caso dos lisímetros ALFA[®], o erro máximo esperado é de $\pm 5,2 \text{ kg}$ ou $\pm 0,43 \text{ mm}$. Por outro lado, no caso dos lisímetros confeccionados com célula HBM[®], o erro de cada célula de 0,02% e a sua capacidade nominal de 10.000 kg (Tabela 2), resulta em erro máximo esperado do lisímetro de $\pm 3,46 \text{ kg}$ ou $\pm 0,29 \text{ mm}$ (ANEXO C).

Desta forma, com base nos erros esperados, os lisímetros confeccionados com células de carga HBM[®] deveriam apresentar erro menor que o lisímetro ALFA[®]. Além disso, os erros esperados sugerem que ambos os lisímetros podem ser utilizados para determinar a evapotranspiração em escala diária, porém talvez não sejam adequados para a escala horária,

escala na qual normalmente ocorre evapotranspiração abaixo de 1 mm e, neste caso, os erros seriam muito grandes se comparados aos valores a serem medidos.

No entanto, estes erros ocorrem quando se trabalha usando toda a faixa de medição das células de carga (no caso, desde 0 a 10.000 kg). Porém, no caso dos lisímetros de pesagem direta, grande parte dessa faixa é constantemente utilizada pela “massa morta” dos lisímetros, fazendo com que apenas uma pequena faixa de medição seja utilizada na prática. Nesta faixa os erros tendem a ser menores, porém, o erro real do lisímetro somente pode ser conhecido após a calibração do mesmo, através do erro padrão da estimativa do modelo de regressão, o qual é um avaliador da sua acurácia. Além das células de carga, os erros máximos esperados nos lisímetros podem também ser oriundos do sistema de aquisição de dados. No entanto, conforme demonstram Marek et al. (1988), os erros associados a estes são considerados pequenos se comparados àqueles decorrentes das células de carga e, desta forma, podem ser negligenciados, assim como foi feito no presente estudo.

Cada célula de carga precisa de um canal diferencial e uma porta de excitação para conexão no *datalogger*. Como o CR1000 dispõe de oito canais diferenciais, estes são suficientes para receber os fios de todas as células de carga. No entanto, o CR1000 dispõe apenas de três portas de excitação, o que torna necessário conectar mais de uma célula na mesma porta. Assim, as três células de carga de cada lisímetro foram conectadas em paralelo em uma única porta de excitação. Conforme a Tabela 2, a resistência elétrica de entrada das células ALFA[®] e HBM[®] são, respectivamente, 780 e 4.450 Ω . Além disso, conforme demonstrado no ANEXO B, cada célula foi excitada com 2,5 V (maior excitação possível do *datalogger*). Assim, baseado na Lei de Ohm, a qual diz que a corrente elétrica é uma razão da tensão aplicada sobre a resistência do circuito elétrico, a corrente a ser aplicada nas três células de carga quando conectadas em paralelo é de 9,6 mA para as células ALFA[®] (3,2 mA cada) e de 1,68 mA para as células HBM[®] (0,56 mA cada). Desta forma, considerando-se que o *datalogger* permite aplicar corrente máxima de 25 mA, a conexão em paralelo das células foi possível.

A célula de carga ALFA[®] retorna 2 mV para cada V de excitação no fundo de escala. Como esta foi excitada com 2,5 V, o sinal de retorno a ser lido pelo *datalogger* pode variar até 5 mV, desde que não haja sobrecarga na célula, ocasião em que o sinal deve ser maior. Por outro lado, a célula de carga HBM[®] retorna para o *datalogger* 2,85 mV para cada V de excitação no fundo de escala. Desta forma, esta célula deve retornar até 7,125 mV. Baseado nesta

análise, definiu-se na programação do CR1000 que as leituras deveriam ser realizadas na faixa até 7,5 mV (ANEXO B). Essa faixa é apenas uma das opções do *datalogger*. Outras opções estão disponíveis, por exemplo, 2,5 e 25 mV (imediatamente abaixo e acima da 7,5 mV, respectivamente). No entanto, a faixa de 2,5 mV seria insuficiente para ler toda a faixa possível de ambas as células (5 e 7,125 mV), enquanto a faixa de 25 mV seria suficiente, porém representaria muita perda de resolução nas medidas.

Para Howell, Schneider e Jensen (1991), a resolução do lisímetro corresponde a menor diferença de massa que pode ser detectada. Conforme Fisher e Allen (1991), essa resolução é igual ao produto da resolução do *datalogger* e da própria célula de carga. Desta forma, antes da construção dos lisímetros foi calculada a resolução de leitura esperada dos mesmos.

O CR1000 utiliza 13 *bits* para realizar a conversão do sinal analógico para sinal digital e, portanto, apresenta 8.192 (2^{13}) possíveis valores para representar este sinal. Ao usar a faixa de leitura do *datalogger* de 7,5 mV, cada parte dos 8.192 possíveis valores representa 0,0009155 mV ($7,5/8.192$). Este valor corresponde à resolução do *datalogger* para a faixa de leitura de 7,5 mV.

Assim, como a célula ALFA[®] apresenta sinal no fundo de escala de 2 mV para cada V de excitação e esta foi excitada com 2,5 V, a resolução teórica da célula é de 2.000 kg mV^{-1} ($10.000/2 \times 2,5$). Portanto, a resolução teórica de cada célula de carga da ALFA[®] lida pelo CR1000 é de 1,83 kg ($2.000 \times 0,0009155$). Porém, como no lisímetro foram utilizadas três células de carga, esta resolução é menor, pois durante a leitura das células, duas podem manter a mesma leitura, enquanto a outra pode variar sua leitura em uma parte, ou seja, 1,83 kg. Assim, na composição da média das três células, esta variação é dividida por três e, portanto, a resolução teórica do lisímetro é de 0,61 kg. Além disso, conforme proposto por Fisher e Allen (1991), uma instrução foi adicionada na programação do *datalogger* para fazer a leitura das células a partir de duas leituras consecutivas, porém com polaridade invertida. Assim, o valor medido é na realidade a média das duas leituras consecutivas e, desta forma, se entre a primeira e a segunda leitura for constatada diferença de uma parte, o valor médio, logo a resolução, representa metade de uma parte. Portanto, na realidade, a resolução final esperada da leitura de massa do lisímetro com célula de carga ALFA[®] utilizando o CR1000 é de 0,3 kg (0,025 mm). No caso do lisímetro com células de carga HBM[®], devido ao sinal no fundo de escala de 2,85 mV V^{-1} , a resolução final

esperada do lisímetro é de 0,21 kg (0,018 mm).

Desta forma, com base nos cálculos apresentados, os lisímetros confeccionados com células de carga HBM® apresentam resolução esperada menor que o lisímetro ALFA®. Além disso, a resolução esperada em ambos os lisímetros pode ser considerada satisfatória para estudos de determinação da evapotranspiração em escala horária e diária.

2.2.3.7 Reconstrução do solo

Após a instalação dos tanques lisimétricos e das células de carga, promoveu-se a reconstrução do solo dentro dos lisímetros. Essa reconstrução foi realizada manualmente por uma equipe composta por três homens, devido à preocupação com a qualidade da reconstrução, pois, segundo Aboukhaled, Alfaro e Smith (1982) e Howell (2004), esta deve permitir que o solo reconstruído se aproxime ao máximo das condições químicas e físicas do solo original.

No processo de reconstrução o volume do tanque foi dividido em duas partes: o fundo cônico e a parte cilíndrica.

Primeiramente, o exutório localizado no centro do fundo cônico foi coberto com um pedaço de manta sintética do tipo bidim (Figura 21A). Essa manta se caracteriza por ser permeável a água e impermeável às partículas sólidas. Em seguida, o fundo cônico foi preenchido com seixo para servir como facilitador da drenagem (Figura 21B) e coberto com bidim para separar o solo a ser reconstruído (Figura 21C).

Desta forma restava apenas a reconstrução do solo, a qual foi realizada na parte cilíndrica do tanque. Assim, as camadas de solo que haviam sido previamente escavadas e separadas em montes diferentes, foram repostas ao tanque do lisímetro, respeitando-se a mesma sequência do solo original. Para isso, foram realizadas marcações nos tanques que indicassem o nível correto a ser seguido durante a reconstrução do solo (detalhe da Figura 21C). Com estas marcas foi possível reconstruí-lo nas camadas 60-130 cm (Figura 21D), 40-60 cm (Figura 21E), 20-40 cm (Figura 21F) e 0-20 cm (Figura 21G). Desta forma, a profundidade útil de solo disponível para as plantas de pinhão-manso ficou em 1,3 m, enquanto o desnível entre a superfície do solo dentro do lisímetro e a borda do mesmo ficou em 5 cm. Durante a reconstrução do solo foi realizada uma ligeira compactação com pilão de 10 kg a cada camada de 20 cm que

era adicionada ao tanque e, desta forma, mesmo depois de oito meses desde que foi realizada a reconstrução do solo, não se observou rebaixamento no nível do solo dentro do lisímetro.

Figura 21 – Etapas da reconstrução do solo nos lisímetros, sendo o exutório coberto com bidim (A), todo o fundo cônico preenchido com seixo (B), bidim para separar o seixo do solo a ser reconstruído (C), marcas realizadas nos tanques para delimitar as camadas a serem reconstruídas (detalhe C) e tanque com solo reconstruído da camada de 60-130 cm (D), 40-60 cm (E), 20-40 cm (F) e 0-20 cm (G)

Figura 21 – Etapas da reconstrução do solo nos lisímetros, sendo o exutório coberto com bidim (A), todo o fundo cônico preenchido com seixo (B), bidim para separar o seixo do solo a ser reconstruído (C), marcas realizadas nos tanques para delimitar as camadas a serem reconstruídas (detalhe C) e tanque com solo reconstruído da camada de 60-130 cm (D), 40-60 cm (E), 20-40 cm (F) e 0-20 cm (G)

2.2.4 Avaliação do solo original

A caracterização do solo da área experimental foi ampliada, pois algumas informações são necessárias para o manejo dos lisímetros, para a análise e interpretação dos resultados obtidos por estes e para determinar a quantidade de massa a ser utilizada na calibração dos mesmos. Considerando-se que estas informações requeridas não se encontravam previamente disponíveis, o solo original da área de cada tratamento foi analisado quanto a sua densidade e curva característica de retenção de água no solo.

2.2.4.1 Amostragem

Após a escavação manual do fosso dos lisímetros, amostras indeformadas foram coletadas utilizando papel alumínio, anel de Kopeck de 3 cm de altura x 5 cm de diâmetro interno, castelinho, martelo pedológico e faca de laboratório (Figura 22A). As amostras foram coletadas em uma trincheira aberta na lateral de cada fosso escavado (Figura 22B). Foram coletadas amostras a 10, 30, 50 e 90 cm, para representar, respectivamente, as camadas de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-130 cm de profundidade.

Em cada camada de um determinado tratamento foram coletadas seis amostras no total, sendo três para cada fosso escavado (Figura 22C). Destas seis amostras, três foram

selecionadas aleatoriamente e foram diretamente utilizadas para determinar a densidade do solo, imediatamente após a coleta. As outras três foram utilizadas para elaborar a curva de retenção de água no solo, a qual, ao final de sua elaboração, também gera como informação a densidade do mesmo. Essa densidade determinada nestas amostras também foi utilizada no computo da densidade do solo. A utilização de três amostras para elaborar a curva de retenção deveu-se a demora implícita a metodologia e a limitação da disponibilidade de câmaras de Richards para o estudo.

A coleta das amostras no campo foi realizada cravando-se os anéis no solo por meio de golpes usando o castelinho e o martelo pedológico. Em seguida, a outra ponta do martelo foi utilizada para escavar o solo de fora dos anéis até poder extraí-los. Após a extração, os mesmos tiveram suas partes laterais limpas com a faca de laboratório e o solo em excesso, acima e abaixo dos anéis, foi preservado para que fosse retirado somente em laboratório. Por fim, as amostras coletadas foram envoltas em papel alumínio e levadas ao laboratório para preparação e análise (Figura 22D).

No laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se o solo em excesso acima e abaixo dos anéis, utilizando faca e água destilada para facilitar o procedimento. Em seguida, o fundo dos anéis foi fechado com pano permeável à água e não ao solo e este foi amarrado ao anel com elástico (Figura 22E).

Figura 22 – Materiais utilizados para a coleta das amostras de solo para a determinação da sua densidade e a elaboração da curva de retenção (A), momento da abertura da trincheira (B), disposição dos anéis de Kopeck para a coleta (C), amostra coletada e sendo embrulhada em papel alumínio para ser conduzida ao laboratório (D) e amostras já preparadas em laboratório (E)

Nota: As amostras de solo observadas em (E) haviam sido colocadas para saturar para determinar a curva de retenção.

2.2.4.2 Curva de retenção

Para a elaboração da curva de retenção de água no solo, as amostras foram colocadas em bandeja contendo 2,8 cm de lâmina de água destilada, durante 72 horas, até ser observado que todas as amostras haviam sido saturadas por ascensão capilar (Figura 22E). Durante o período de saturação, o nível de água destilada na bandeja foi repostado conforme necessidade.

Após a saturação, cada amostra teve sua massa determinada em balança semi-analítica de 0,01 g de precisão. Essa massa foi denominada massa saturada (m_{sat}) e sua tensão correspondente a 0 cm.c.a..

Em seguida, aplicaram-se às amostras tensões crescentes para estabelecer os pontos da curva de retenção $\Theta(\Psi_m)$, onde Θ corresponde à umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Ψ_m é o potencial matricial, o qual pode ser entendido como a tensão aplicada à amostra (cm.c.a.). Foram aplicadas tensões de 10, 20 e 40 cm.c.a. utilizando mesa de tensão (Figura 23A), conforme descrito em Romano, Hopmans e Dane (2002). Após a mesa de tensão, aplicou-se às amostras tensões de 100, 300, 500, 1.000, 5.000 e 15.000 cm.c.a., utilizando câmaras de Richards (Figura 23B), conforme descrito em Dane e Hopmans (2002).

Em cada tensão aplicada às amostras, quando a umidade do solo se estabilizava, sua massa era determinada. Ao final, ou seja, após determinar as massas relacionadas às tensões de 0 a 15.000 cm.c.a. (m_{sat} , ..., $m_{15.000}$), as amostras foram colocadas em estufa para secar a 105 °C durante 24 horas, período este identificado com suficiente para que apresentassem massa constante. Após as 24 horas, as amostras foram retiradas e tiveram sua massa determinada, sendo esta massa definida como massa seca (m_{seca}). Por fim, o solo da amostra foi descartado e a massa da tara (anel, pano e elástico) foi determinada (m_{tara}).

Figura 23 – Mesas de tensão (A) e câmaras de Richards (B) utilizadas na elaboração da curva de retenção

Após a coleta dos dados procedeu-se a elaboração da curva de retenção. Para isso, determinou-se a densidade do solo (d_s) das amostras aplicando-se os dados obtidos na eq. (7):

$$d_s = \frac{m_{\text{seca}} - m_{\text{tara}}}{\text{vol}} \quad (7)$$

sendo d_s a densidade do solo (g cm^{-3}), m_{seca} a massa da amostra seca (g), m_{tara} a massa da tara (g) e vol o volume do anel de Kopeck (cm^3).

Em seguida foi calculada a umidade volumétrica das amostras para cada tensão aplicada usando a eq. (8):

$$\theta_h = \frac{m_h - m_{\text{seca}}}{m_{\text{seca}} - m_{\text{tara}}} \times d_s \quad (8)$$

sendo θ_h a umidade volumétrica correspondente a tensão h ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), m_h a massa da amostra na tensão h (g), m_{seca} a massa da amostra seca (g), m_{tara} a massa da tara (g) e d_s a densidade do solo (g cm^{-3}).

De posse dos pares de dados $\Theta(\Psi_m)$ elaborou-se as curvas de retenção de água no solo utilizando os dados médios de Θ das três amostras de cada camada, em cada tratamento. Para a elaboração das curvas utilizou-se o software RETC (VAN GENUCHTEN et al., 2009). As curvas foram ajustadas segundo o modelo proposto por van Genuchten (1980), o qual é apresentado na eq. (9):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (9)$$

onde Θ é a umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), Θ_r é a umidade volumétrica residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), Θ_s é a umidade volumétrica na saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), h é a tensão aplicada, ou seja, o potencial matricial (cm.c.a.) e α (cm^{-1} ; $\alpha > 1$), n e m (adimensionais) são parâmetros de ajuste do modelo.

Conforme recomendado por van Genuchten (1980), aplicou-se a restrição descrita em Mualem (1976) para o ajuste do parâmetro m , ou seja, este foi definido como uma função do valor do parâmetro n , conforme a eq. (10):

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (10)$$

sendo m e n parâmetros adimensionais da equação de van Genuchten ($0 < m < 1$; $n > 1$).

As curvas de retenção ajustadas para cada camada de cada tratamento, bem como os parâmetros do modelo que foram ajustados (Θ_r , Θ_s , n e α) se encontram apresentados no ANEXO D.

Conforme sugerido por Kirkham (2005), considerando-se que a textura do solo da área experimental é argilosa ou muito argilosa (ANEXO A), atribuiu-se às tensões de 300 e 15.000 cm.c.a. a condição de umidade na capacidade de campo (Θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}), respectivamente. Desta forma, observa-se no ANEXO D que os valores de Θ_{CC} e Θ_{PMP} variam pouco entre os tratamentos e camadas, sendo que os valores de Θ_{CC} se encontram entre 0,35 e 0,46 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e Θ_{PMP} entre 0,31 e 0,4 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Como consequência, pouca variação ocorre na capacidade de água disponível (CAD) observada entre os tratamentos e as camadas estudadas, sendo que os valores se situam entre 0,04 e 0,07 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Portanto, considerando-se o perfil de 130 cm de solo útil para as plantas dentro dos lisímetros, a CAD total do tratamento irrigado por pivô central e do tratamento não irrigado é de 72 mm, enquanto que a CAD do tratamento irrigado por gotejamento é de 83 mm.

2.2.4.3 Densidade do solo

Conforme explicado anteriormente, na elaboração da curva de retenção também se determinou a densidade de três amostras de solo de cada camada em cada tratamento. As outras três amostras, as quais não haviam sido utilizadas para a elaboração da curva de retenção, foram utilizadas exclusivamente para determinar a densidade imediatamente após a coleta. Portanto, ao todo seis amostras de cada camada em cada tratamento foram utilizadas para a determinação da densidade do solo. A densidade de todas as amostras foi obtida conforme explicado para a elaboração da curva de retenção e aplicando-se os dados na eq. (7).

2.2.5 Avaliação do solo reconstruído

Como a reconstrução do solo dentro dos lisímetros deve ser realizada de forma a permitir que o mesmo se aproxime ao máximo da condição do solo original (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982), cuidados foram tomados durante esta atividade. Considerando-se que as camadas de solo foram retiradas e reconstruídas na mesma ordem, a reconstrução química é segura. No entanto, para avaliar a qualidade da reconstrução física, uma boa alternativa é comparar a densidade do solo reconstruído com aquela do original.

Para isso, durante o processo de reconstrução do solo, amostras foram coletadas seguindo a mesma metodologia descrita na amostragem para caracterização do solo original. Foram coletadas três amostras de cada camada em cada lisímetro à medida que a reconstrução das camadas era finalizada. Porém, para evitar a amostragem de camadas viciadas devido ao pisoteio e à pilagem, os primeiros 10 cm de solo foram escavados e então se realizou a coleta (Figura 24).

Assim, estas amostras foram utilizadas para determinar a densidade do solo após a sua reconstrução. A determinação da densidade seguiu a mesma metodologia descrita para a caracterização do solo original. Desta forma, a qualidade física da reconstrução do solo foi avaliada comparando-se as densidades determinadas no solo original e no solo reconstruído.

Figura 24 – Coleta das amostras para determinação da densidade do solo após a sua reconstrução

2.2.6 Teste das células de carga em laboratório

Antes da instalação das células de carga nos lisímetros, realizou-se um teste com um exemplar de cada célula em laboratório.

Neste teste as células foram monitoradas pelo CR1000 durante quatro dias consecutivos sob condição de carga zero. O termohigrômetro não foi instalado para esta análise. O *datalogger* foi mantido sob as mesmas condições ambientais as quais estavam submetidas as células de carga e o laboratório permaneceu fechado durante todo o período para minimizar flutuações nas condições do ambiente.

Na análise dos dados, o sinal de cada minuto das células foi convertido para base de massa usando a inclinação teórica da reta de calibração de $5.000 \text{ (kg (mV V}^{-1})^{-1})$ para a célula ALFA[®] e $3.508,77 \text{ (kg (mV V}^{-1})^{-1})$ para a célula HBM[®]. Estes foram calculados aplicando-se os dados da Tabela 2 na eq. (6).

2.2.7 Calibração dos lisímetros

Em teoria, o trabalho de calibração ideal de qualquer lisímetro de pesagem consiste em, com o solo apresentando umidade na condição de ponto de murcha permanente

(PMP), adicionar e depois retirar massas que no total representem a mesma massa da CAD do solo em questão. Essa condição teórica permitiria explorar durante a calibração, a mesma faixa de uso das células de carga na situação em que os lisímetros serão utilizados durante o monitoramento da cultura, ou seja, entre PMP e a capacidade de campo (CC). No entanto, tendo em vista que na prática não se consegue estabelecer esta condição desejada de umidade no solo, o trabalho de calibração é realizado com o solo em qualquer condição de umidade, preferencialmente mais seco. Assim, considerando-se que as células de carga são fabricadas para variar linearmente o seu sinal com a massa a qual é submetida (GOMMOLA, 2000), assume-se que a calibração feita para uma determinada faixa seja válida para toda a faixa de trabalho da célula de carga.

Com base na análise dos dados do ANEXO D, a maior CAD entre todos os tratamentos é a do tratamento irrigado por gotejamento (83 mm). Desta forma, seriam necessários 996 kg para representar a CAD durante a calibração. Por questão de comodidade foram utilizados 1.000 kg de massa durante o procedimento de calibração de todos os lisímetros. Os 1.000 kg foram divididos em 44 massas padrão que foram assumidas como referência, sendo dez de 2 kg (0,17 mm), dezoito de 10 kg (0,83 mm) e dezesseis de 50 kg (4,17 mm). As massas de 50 kg foram divididas em duas de 25 kg, para diminuir o esforço necessário para carregá-las.

As massas padrão foram confeccionadas adicionando-se areia seca ao ar dentro de duas sacolas plásticas impermeáveis de alta resistência do tipo cristal. Para a confecção das massas de 2 kg (Figura 25A) utilizou-se a balança semi-analítica da marca Shimadzu[®], modelo UX4200H (capacidade de 4,2 kg e 0,01 g de divisão), enquanto que para a confecção das massas de 10 e 25 kg (Figura 25B) foi utilizada a balança da marca KLD[®], modelo Scala 50 (capacidade de 48,5 kg e 5 g de divisão). Depois de acertada a massa desejada nas balanças, os sacos foram fechados hermeticamente para evitar o ganho ou perda de massa devido à umidade. Por fim, todas as massas preparadas foram guardadas em local coberto, de onde foram retiradas apenas para o uso na calibração (Figura 25C).

Figura 25 – Confeção das massas padrão de 2 kg (A), 10 kg (B) e diferentes massas padrão preparadas para a calibração (C)

Para a calibração, um termohigrômetro foi instalado dentro do fosso dos lisímetros, abaixo daquele que utiliza célula de carga HBM®. Este termohigrômetro, além da temperatura do *datalogger* e dos dados obtidos na estação meteorológica, foi utilizado para descrever as condições do ambiente durante a calibração.

Os lisímetros tiveram sua superfície coberta com lona plástica para evitar a evaporação da água do solo e o sistema de drenagem foi mantido fechado. Assim, tendo em vista que a calibração foi realizada em períodos sem chuva, não houve entrada e nem saída de água no sistema, e, portanto, toda variação do sinal das células de carga foi atribuída às massas padrão. Além disso, visando eliminar qualquer possível influência do vento nas leituras, durante a calibração os lisímetros foram protegidos por uma barreira de vento feita de lona de ráfia de 5 x 5 m e 2 m de altura (Figura 26). Este procedimento foi assumido como suficiente para considerar que não houve vento atuando sobre os lisímetros durante a calibração. Por fim, a disposição das massas durante a calibração foi feita da maneira mais distribuída possível pela área dos lisímetros, procurando-se não concentrá-las somente em um ponto. A porta do fosso de acesso foi sempre mantida fechada durante as calibrações.

Figura 26 – Abertura dos buracos para instalação dos mourões (A), vista dos mourões e fios de arame já instalados (B), barreira de lona construída com a porta de acesso aberta (C) e vista superior do lisímetro protegido pela barreira de lona com a porta de acesso fechada (D)

A sequência de adição e retirada das massas padrão dos lisímetros foi realizada intercalando-as (ANEXO E), visando explorar melhor as características das células em cada faixa de utilização das mesmas. A calibração foi realizada em um lisímetro por vez e durou, aproximadamente, 3 horas (Figura 27). Durante o procedimento de calibração, um minuto foi necessário para acrescentar ou retirar as massas dos lisímetros. Como este minuto incluía as oscilações devidas à adição ou retirada da massa, outro minuto foi necessário para deixar o lisímetro repousar, permitindo a coleta da média e do desvio padrão das leituras das três células de carga correspondente à massa em questão. Portanto, o primeiro minuto foi utilizado para coletar os dados das células de carga com o lisímetro sem nenhuma massa adicionada (tara). Em seguida, foram adicionadas progressivamente as massas N° 1 a 44. Posteriormente estas foram retiradas no sentido inverso. Por fim, o último minuto foi utilizado para coletar novamente os dados sem nenhuma massa adicionada.

Figura 27 – Momento da calibração do lisímetro do tratamento irrigado por gotejamento e que utiliza célula de carga ALFA®

Já de posse dos dados, a média do sinal das três células de carga e a massa acumulada no lisímetro durante a calibração foi utilizada para ajustar o modelo de regressão linear da calibração. No total foram utilizados 89 pares de dados para o ajuste. Os desvios padrão foram utilizados para inferir acerca da variabilidade dos dados utilizados para compor as médias (precisão). Assim, a equação de calibração de cada lisímetro foi ajustada conforme consta na eq. (11):

$$Massa = a + b \times \overline{células} \pm \varepsilon \quad (11)$$

sendo Massa a massa do lisímetro (kg), a o intercepto, b o coeficiente angular, $\overline{células}$ a média da leitura das células de carga 1, 2 e 3 ($mV V^{-1}$) e ε o erro padrão associado a estimativa da massa do lisímetro (kg). Ressalta-se que, na prática, o intercepto da equação pode ser negligenciado, pois o mesmo representa somente a tara da massa do lisímetro ao iniciar a calibração do mesmo.

A histerese é um dos erros dos lisímetros de pesagem que podem ser avaliados pela calibração. Esta se refere à diferença entre o sinal que é obtido pelo sistema de pesagem para uma mesma quantidade de massa, porém durante etapas distintas, sendo elas o carregamento e o descarregamento. Desta forma, após a calibração dos lisímetros, os dados foram aplicados dentro

das equações lineares ajustadas e, assim, determinou-se a histerese dos lisímetros por meio da eq. (12):

$$H = M_C - M_D \quad (12)$$

sendo H a histerese (kg), M_C a massa determinada no carregamento (kg) e M_D a massa determinada no descarregamento (kg).

2.2.8 Teste de sensibilidade à temperatura

A sensibilidade dos lisímetros à variação da temperatura foi avaliada após a calibração dos mesmos. Para isso, os lisímetros foram mantidos com sua superfície coberta com lona plástica para evitar a evaporação da água do solo e o sistema de drenagem foi mantido fechado. Além disso, visando eliminar qualquer possível influência do vento nas leituras, a barreira de vento que fora construída para a calibração dos lisímetros foi mantida (Figura 26). Mesmo assim, considerando-se que sob velocidade do vento elevada pode haver o turbilhonamento do ar dentro da área protegida, foram excluídos da análise os dados determinados em períodos onde a velocidade média do vento determinada na estação meteorológica (Figura 10) superou 3 m s^{-1} ou a máxima foi maior que 6 m s^{-1} . Assumiu-se que valores abaixo destes limites representaram uma condição de atmosfera estável e que não resultou no turbilhonamento do ar. Assim, nestas condições, considerou-se que a temperatura do ar foi o único fator que poderia acrescentar erros aos lisímetros.

Nessa condição imposta, um sistema ideal de pesagem deveria determinar um valor de massa constante ao longo do tempo. Essa afirmativa foi avaliada comparando-se a massa e os desvios padrão obtidos pelos lisímetros, com a temperatura determinada na estação meteorológica, pelo termohigrômetro instalado dentro do fosso dos lisímetros e aquela determinada pelo próprio *datalogger* dentro da caixa selada. Essas variáveis foram monitoradas continuamente durante um dia (tratamento pivô central e sem irrigação) ou dois dias (tratamento gotejamento). O teste foi realizado nos dois lisímetros do mesmo tratamento simultaneamente.

Para o teste utilizou-se os dados das saídas de 10 min, pois esta saída será utilizada para monitorar a massa do pinhão-manso nos lisímetros e, assim, objetivou-se testar os mesmos na mesma escala temporal em que depois serão utilizados no estudo com as plantas. Os

dados médios e os desvios padrão obtidos foram depois aplicados dentro das equações de calibração previamente ajustadas para determinar o seu equivalente em termos de massa.

2.2.9 Teste de sensibilidade ao vento

A avaliação da sensibilidade dos lisímetros ao vento foi realizada após os testes de sensibilidade à temperatura. Para isso, os lisímetros foram mantidos com sua superfície coberta com lona plástica para evitar a evaporação da água do solo e o sistema de drenagem foi mantido fechado. Algumas pedras, mourões e pesos que haviam sido utilizados na calibração foram colocados sobre os lisímetros para ajudar a manter a lona plástica em seu local. O quebra-vento foi removido para o vento atuar sobre os lisímetros.

Com o intuito de representar uma planta adulta de pinhão-manso sendo cultivada no lisímetro, protótipos de árvores foram construídos usando tubos e conexões de PVC rígido, arame, abraçadeiras plásticas e lonas de ráfia (Figura 28). Os protótipos representam uma planta que tem uma única raiz de 1 m, inserida no solo com auxílio de um trado. A parte aérea foi composta por um único ramo ortotrópico de 3 m de altura e quatro ramificações laterais de 2 m que saem do ramo ortotrópico a 1 m do nível do solo. Os ramos laterais formam ângulo de 90° entre si. O dossel vegetativo foi composto por lonas de ráfia que ligam os ramos laterais até a extremidade superior do ramo ortotrópico. Toda a estrutura do protótipo foi fixada aos tanques dos lisímetros usando arames. Por dentro do eixo central foi disposta uma barra de ferro de 3 m para ajudar a reforçar a estrutura e diminuir o risco de quebra. Desta forma, toda e qualquer ação do vento no protótipo foi automaticamente transferida para o sistema de pesagem.

Figura 28 – Vista lateral do projeto do protótipo da árvore de pinhão-manso (A), vista inclinada superior (B), protótipo já construído (C) e instalado nos lisímetros (D)

Nessa condição imposta, assim como para o teste de temperatura, um sistema ideal de pesagem deveria determinar um valor de massa constante ao longo do tempo. No caso dos lisímetros, essa hipótese foi avaliada comparando-se a massa e os desvios padrão obtidos pelos lisímetros com a velocidade média do vento determinada na estação meteorológica. Essas variáveis foram monitoradas continuamente durante seis dias consecutivos e foi possível avaliar todos os lisímetros ao mesmo tempo.

Ressalta-se que os resultados obtidos neste teste não são suficientes para estudar o problema, pois foi trabalhado com uma “planta” isolada no campo que absorveu diretamente a ação do vento, diferentemente do que ocorre com uma cultura, onde o vento que

atinge uma planta no centro da área de cultivo é bastante amortecido pelas plantas vizinhas. Além disso, normalmente o dossel vegetativo possui algum grau de porosidade, o que permite que o vento possa fluir por dentro do mesmo. No caso da “planta” utilizada, o dossel vegetativo não era poroso e isso fez com que todo o vento fosse bloqueado.

Para este teste, assim como no teste de temperatura, utilizou-se os dados das saídas de 10 min. Os dados médios e os desvios padrão obtidos foram depois aplicados dentro das equações de calibração previamente ajustadas para determinar o seu equivalente em termos de massa.

2.3 Resultados e discussões

2.3.1 Avaliação da reconstrução do solo

Analisando-se as densidades determinadas em todos os tratamentos e camadas, tanto no solo original, quanto no reconstruído, o desvio padrão oriundo da obtenção das médias foi normalmente inferior a $0,1 \text{ g cm}^{-3}$, indicando que houve pouca variabilidade dos dados utilizados para compor o valor médio (Figura 29). Essa observação já era esperada na análise do solo original, pois em cada tratamento as amostras foram coletadas próximas entre si, priorizando-se a caracterização da área no entorno dos lisímetros. Assim, pouca variabilidade espacial era esperada nessa situação. Já para análise do solo reconstruído nos lisímetros, isso indicou que a reconstrução de cada camada foi realizada de maneira uniforme, pois a variabilidade observada foi pequena.

Com relação ao solo original, considerando-se a mesma camada, a densidade variou pouco entre os tratamentos, indicando que as áreas dos diferentes tratamentos apresentavam perfis de densidade semelhantes (Figura 29). A maior diferença foi encontrada na camada de 20-40 cm (coleta de 30 cm), onde a densidade do solo observada na área do tratamento irrigado por pivô central foi igual a $1,46 \text{ g cm}^{-3}$ e na área do tratamento sem irrigação foi igual a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, portanto, apenas $0,06 \text{ g cm}^{-3}$ de diferença, o que pode ser considerado um valor pequeno. Ainda na Figura 29, observou-se a existência de queda na densidade do solo original à medida que se aprofunda no perfil do mesmo. A coleta de 10 cm apresentou a maior densidade em todos os tratamentos, seguida pela de 30 cm, depois pela de 50 cm e, por fim, a

coleta de 90 cm que apresentou a menor densidade. Essa observação também já era esperada, pois as camadas superiores normalmente tendem a ser mais compactadas devido ao trabalho com máquinas e pisoteio humano ou animal.

A densidade do solo original no tratamento irrigado por pivô central variou de 1,31 a 1,55 g cm⁻³, no tratamento irrigado por gotejamento de 1,27 a 1,53 g cm⁻³ e no tratamento sem irrigação de 1,29 a 1,58 g cm⁻³. Os valores obtidos neste estudo para as camadas de 0-20 e 20-40 cm são maiores que os valores típicos para solos de textura fina. Segundo Libardi (2005), a densidade deste tipo de solo normalmente varia de 1 a 1,4 g cm⁻³, enquanto que para Hillel (1998), esses valores normalmente são menores que 1,2 g cm⁻³. Assim, comparando-se os valores obtidos com aqueles citados por estes autores, pode-se concluir que o solo da área experimental situado nas referidas camadas apresentava certo grau de compactação, requerendo o preparo e manejo do mesmo visando a sua descompactação. Além disso, o solo na camada de 40-60 cm também apresentou adensamento considerável, sendo que os valores de densidade encontrados se situaram em torno do limiar superior de 1,4 g cm⁻³. Por fim, apesar de a densidade encontrada na camada de 60-130 cm ser maior que o valor de 1,2 g cm⁻³ citado por Hillel (1998), acredita-se que o solo desta camada não se encontrava compactado e que a densidade observada nos diferentes tratamentos para esta camada é normal.

Figura 29 – Densidade e barras de desvio padrão do solo original e reconstruído nos lisímetros ALFA® e HBM®, os quais foram determinados nas áreas dos tratamentos irrigado por pivô central (A), gotejamento (B) e sem irrigação (C)

Figura 29 – Densidade e barras de desvio padrão do solo original e reconstruído nos lisímetros ALFA® e HBM®, os quais foram determinados nas áreas dos tratamentos irrigado por pivô central (A), gotejamento (B) e sem irrigação (C)

O trabalho de reconstrução do solo resultou em densidades que variaram desde $1,17 \text{ g cm}^{-3}$, obtida na profundidade de 90 cm do lisímetro HBM® do tratamento irrigado por pivô central, até $1,44 \text{ g cm}^{-3}$, obtida na profundidade de 10 cm do lisímetro HBM® do tratamento irrigado por gotejamento (Figura 29).

No tratamento irrigado por pivô central, o lisímetro ALFA® apresentou densidade média do solo de $1,31 \text{ g cm}^{-3}$ e o HBM® $1,26 \text{ g cm}^{-3}$. Da mesma forma, no tratamento irrigado por gotejamento a densidade média do solo no lisímetro ALFA® foi de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ e no HBM® de $1,33 \text{ g cm}^{-3}$. Por fim, a reconstrução do solo dentro dos lisímetros do tratamento sem irrigação também apresentou resultado similares. Neste tratamento, a densidade média no lisímetro ALFA® e HBM® foram, respectivamente, $1,32$ e $1,3 \text{ g cm}^{-3}$. Esses valores pouco discrepantes entre si demonstram que a reconstrução do solo resultou em densidades semelhantes entre os lisímetros dos diferentes tratamentos, embora tenha havido pequenas diferenças entre as camadas dentro de cada lisímetro.

Conforme a Figura 29, o processo de reconstrução do solo nos lisímetros não conseguiu reestabelecer a densidade observada no solo original nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-

60 cm. No entanto, isso não caracteriza uma deficiência da reconstrução em si, pois, na realidade, o solo original apresentava-se demasiadamente compactado. Nesta situação, a prática desejável não é aumentar a densidade na reconstrução, mas sim realizar a descompactação do solo da área experimental. Essa constatação se embasa no fato de que as densidades obtidas nestas camadas após a sua reconstrução, ficaram dentro dos intervalos típicos mencionados por Hillel (1998) e Libardi (2005) para este tipo de solo. Por fim, na camada de 60-130 cm, a densidade do solo reconstruído se aproximou satisfatoriamente dos valores obtidos no solo original.

2.3.2 Tempo de construção, dificuldades encontradas e custos

A construção dos seis lisímetros de pesagem direta deste estudo foi realizada em, aproximadamente, um ano (setembro de 2010 até agosto de 2011). O tempo em que foram realizadas algumas das principais etapas da construção é apresentado a seguir.

Basicamente, as atividades que demandaram mais tempo foram a construção da alvenaria e dos tanques lisimétricos. Cada uma foi realizada em torno de quatro meses, porém estas puderam ser realizadas simultaneamente, haja vista que uma não dependia da outra. Outra atividade que demandou bastante tempo foi a construção do sistema de drenagem, a qual, devido a sua complexidade, foi realizada em, aproximadamente, dois meses. As etapas de escavação e reconstrução manual do solo foram realizadas em torno de 10 dias cada uma, enquanto a escavação complementar utilizando retroescavadeira necessitou três dias. Por fim, o transporte dos tanques até a área experimental, a instalação dos mesmos e a instalação das células de carga foram realizadas em dois dias cada.

Os tempos apresentados não tem o objetivo de representar uma regra definitiva, mas sim uma referência a qual possa ser consultada, pois os tempos requeridos para a construção podem variar bastante dependendo das características específicas de cada estudo.

Devido ao fato de este estudo ter sido realizado integralmente no campo, o mesmo ficou a mercê das imposições do clima durante o período de construção dos lisímetros. Desta forma, a principal dificuldade encontrada na construção dos mesmos foi a chuva, pois durante dias chuvosos o trabalho de construção dos lisímetros precisava ser interrompido. Na Figura 30 e Tabela 3, nota-se que a chuva, apesar de ter sido mais concentrada em janeiro de 2011, foi bastante distribuída ao longo do período entre 01/10/2010 e 30/04/2011. Prova disso é

que em apenas 102 dos 212 dias do referido período não houve chuva. Assim, durante esse período o trabalho de construção dos lisímetros foi diversas vezes interrompido, pois este período chuvoso coincidiu com etapas que eram bastante influenciadas pela chuva, por exemplo, escavação do solo e construção da alvenaria.

No entanto, não somente os dias chuvosos prejudicaram a construção dos lisímetros. Cabe salientar que os dias após a ocorrência de chuva também dificultavam a construção dos mesmos, pois tornava o trabalho no solo impraticável, necessitando de alguns dias para secá-lo até que fosse possível ter condições para trabalhar novamente.

Figura 30 – Precipitação ocorrida em Piracicaba-SP entre os dias 01/10/2010 e 30/04/2011

Tabela 3 – Precipitação total mensal e número de dias com e sem chuva em Piracicaba-SP no período entre 01/10/2010 e 30/04/2011

Mês	Precipitação total (mm)	Dias chuvosos	Dias sem chuva
Outubro/2010	86,6	11	20
Novembro/2010	38,3	12	18
Dezembro/2010	225,7	19	12
Janeiro/2011	400,7	23	8
Fevereiro/2011	137,9	15	13
Março/2011	218,3	20	11
Abril/2011	131,2	10	20
Total	1.238,7	110	102

Para exemplificar, uma das etapas que a chuva dificultou a construção dos lisímetros foi a de escavação manual do fosso. Nesta etapa foram utilizadas ferramentas comuns, como pá, enxada e picareta. Portanto, a chuva fazia com que o solo se encontrasse com muito barro, aumentando sua aderência nas ferramentas e, por consequência, inviabilizando o trabalho no campo. Essa mesma dificuldade foi posteriormente encontrada na etapa de reconstrução do solo dentro dos tanques lisimétricos.

A construção da alvenaria também foi prejudicada pelas chuvas. Com o período chuvoso, o tempo necessário para secar o concreto foi maior que o normal. Além disso, por muitas vezes a água da chuva escoava pela superfície do solo externo e se acumulava no fosso dos lisímetros em construção, formando uma lâmina de água no mesmo, pois o solo argiloso demorava em drená-la. Nestas situações foi necessário baldear água manualmente para fora ou esperar até que a água fosse naturalmente drenada ou evaporada. Em outra ocasião, o excesso de chuvas provocou o desmoronamento da parede de solo lateral dos lisímetros que ainda estavam em construção, fazendo com que fosse necessário retirar toneladas de solo de dentro do mesmo manualmente (Figura 31).

Figura 31 – Vista do fosso (A) e vista externa (B) do desmoronamento das paredes dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento, ocasionado pelo excesso de chuvas ocorrido durante a fase de construção da alvenaria

O trabalho com maquinário na área experimental também foi prejudicado pelas chuvas. Sob condições de solo úmido procurou-se evitar ao máximo a entrada de máquinas na área experimental para minimizar a possibilidade de compactação. Mesmo assim, em algumas situações foi imperiosa a entrada das máquinas. Conforme explicado anteriormente, a instalação

dos tanques dos lisímetros no fosso foi realizada com caminhão munck. No entanto, ao trabalhar com este no solo úmido devido à chuva, o mesmo derrapava em excesso e não conseguia sequer chegar até os lisímetros, fazendo com que fosse necessário rebocá-lo (Figura 32). Além disso, no momento de fixação da base do munck no chão para poder içar os tanques, o solo úmido não oferecia suporte suficiente para o caminhão que deslizava.

Figura 32 – Caminhão munck sendo rebocado por trator para instalação dos tanques lisimétricos

O custo total de construção, calibração e teste dos seis lisímetros de pesagem direta deste estudo foi de, aproximadamente, R\$ 215.000,00, o que resulta em custo unitário aproximado de R\$ 35.800,00 (Tabela 4). No entanto, este custo unitário é apenas uma estimativa simplificada, obtida a partir da divisão do custo total pelo número de lisímetros. Na realidade, devido às características destes lisímetros, alguns custos não foram divididos desta maneira. Por exemplo, foram utilizados três *datalogger* para os seis lisímetros, o que resulta em meio *datalogger* por lisímetro, fato que é impossível do ponto de vista físico. Na construção da alvenaria, o mesmo fosso de acesso servia dois lisímetros, assim como a rede elétrica, onde o mesmo cabeamento levava a energia até ambos. Além destes custos, outros realizados na calibração e teste dos lisímetros foram comuns a todos estes.

Os maiores custos dos lisímetros foram devidos à construção da alvenaria, dos tanques lisimétricos e os sistemas de pesagem. Estes juntos representaram, aproximadamente,

84% do custo total do projeto. Os trabalhos de calibração e testes de sensibilidade à temperatura e vento representaram, somente, 1,2% do custo total. Sendo assim, devido ao baixo custo se comparado ao custo total do projeto, recomenda-se que nesta parte de calibração e testes não sejam feitas economias desnecessárias. Estas atividades são fundamentais para alicerçar o conhecimento daqueles que constroem lisímetros de pesagem para estudar o consumo hídrico das plantas, permitindo ao usuário conhecer melhor o equipamento que fora construído, de tal forma que aumenta o poder de decisão do mesmo sobre a qualidade das medidas de evapotranspiração que são obtidas.

Assim como mencionado para o tempo de construção dos lisímetros, os custos aqui apresentados não tem o objetivo de representar uma regra definitiva, mas sim uma referência que pode ser consultada, haja vista que estes custos podem variar em função das características específicas de cada estudo.

Tabela 4 – Custo de construção, calibração e teste dos seis lisímetros de pesagem direta

Descrição	Custo (R\$)
Escavação e reconstrução manual do solo	6.491,60
Alvenaria	61.860,00
Tanques lisimétricos	81.000,00
Sistema de aquisição de dados (3 <i>datalogger</i>)	14.929,85
Sistema de pesagem ALFA [®] (células de carga + suportes)	18.033,71
Sistema de pesagem HBM [®] (células de carga + suportes)	18.987,75
Sistema de drenagem	4.777,28
Rede elétrica	3.330,03
Calibração, teste de temperatura e vento	2.651,23
Custos diversos	2.352,79
Total	214.414,24

2.3.3 Avaliação das células de carga em laboratório

Durante o período de avaliação das células de carga em laboratório, a temperatura que foi determinada pelo *datalogger* variou entre 19 e 21,5 °C. Os valores apresentados por ambas às células foram diferentes de 0 kg, mesmo tendo estas sido submetidas à condição de carga zero. Segundo Gommola (2000), esse fenômeno não constitui um defeito das mesmas, mas sim um tipo de tara, a qual se deve às características intrínsecas da construção de cada exemplar, podendo variar entre células da mesma marca e modelo.

A análise das células de carga em laboratório demonstrou que a ALFA[®] apresentou oscilação acentuada na determinação da massa ao longo do tempo (Figura 33A; Tabela 5). Com exceção da madrugada e da manhã do primeiro dia de avaliação, em geral a massa determinada, embora com bastante oscilação, apresentou-se em torno da média. Considerando-se a média da massa durante o período avaliado como sendo o valor real da massa aplicada à célula, a ALFA[®] apresentou valores dentro do erro máximo esperado de ± 3 kg, conforme descrito nas suas especificações técnicas (Tabela 2). A diferença entre os valores máximo e mínimo obtidos (1,77 kg) representaram, apenas, 29,4% dessa margem de erro.

Diferentemente do observado para a célula ALFA[®], a HBM[®] apresentou determinações mais estáveis da massa, com os valores oscilando pouco em torno da média (Figura 33B; Tabela 5). Assim, isso resultou em somente 0,18 kg de diferença entre o valor máximo e o mínimo ao longo do período de monitoramento, ou seja, 4,4% dos 4 kg possíveis pela margem de erro (± 2 kg).

Comparando-se os desvios encontrados em ambas as células, nota-se que, aquele encontrado para a célula de carga ALFA[®] foi quase 10 vezes maior que o encontrado na célula HBM[®].

Baseado nestes dados, a célula de carga HBM[®] foi mais acurada na determinação da massa real se comparada à célula ALFA[®], pois a dispersão das massas que foram determinadas ao longo do tempo em torno da média foi menos acentuada.

Figura 33 – Massa determinada em laboratório pelas células de carga ALFA® (A) e HBM® (B), acompanhada da temperatura determinada pelo *datalogger* (Temp CR1000), durante quatro dias consecutivos sem nenhuma carga atuando sobre as células

Tabela 5 – Resultados do teste das células de carga ALFA® e HBM® realizado em laboratório

	ALFA®	HBM®
Máximo (kg)	26,91	-58,51
Média (kg)	26,90	-58,97
Mínimo (kg)	26,73	-60,27
Módulo do Máximo - Mínimo (kg)	0,18	1,77
% utilizado do erro máximo esperado	4,4	29,4

Conforme explicado anteriormente, a composição de cada valor das massas determinadas em um minuto foi oriunda da média de 30 valores determinados a cada 2 s. Nessa condição, o desvio padrão observado na composição do valor médio foi diferente entre as células (Figura 34).

A célula ALFA® apresentou valores de desvio padrão substancialmente superiores aos observados na célula HBM®. Na média, o desvio padrão obtido na célula ALFA® foi igual a 0,422 kg, sendo, aproximadamente, 82 vezes maior que o valor médio encontrado na célula HBM® (0,005 kg). Além disso, 95% dos valores de desvio padrão obtidos para a célula ALFA® se encontram acima de 0,19 kg e, aproximadamente, 50% se localizou acima de 0,46 kg. Por outro lado, em torno de 96,55% dos valores obtidos para a célula HBM® se encontraram abaixo de 0,004 kg.

Esses dados indicaram que a célula de carga ALFA® foi menos precisa que a HBM®, pois os valores utilizados para compor a média determinada a cada minuto foram mais dispersos em torno desta.

Figura 34 – Desvio padrão da massa determinada em laboratório pelas células de carga ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) durante quatro dias consecutivos sem nenhuma carga atuando sobre as mesmas

2.3.4 Calibração dos lisímetros

2.3.4.1 Lisímetros do tratamento irrigado por pivô central

Durante a calibração do lisímetro ALFA[®], o tempo se encontrava com céu aberto e ensolarado, a temperatura do ar variou entre 19,6 e 28,9 °C e a umidade relativa entre 39,4 e 69,2% (Tabela 6). Embora a amplitude térmica no ar externo tenha sido de 9,3 °C, a temperatura medida pelo *datalogger* instalado dentro da caixa selada no túnel de interligação dos lisímetros variou apenas 0,7 °C. Variação pequena também foi observada para a temperatura determinada pelo termohigrômetro que se encontrava instalado no fosso dos lisímetros, localizado embaixo do lisímetro HBM[®]. Neste termohigrômetro a amplitude térmica foi de 2,1 °C. Houve bastante vento durante a calibração, apresentando valores médios horários que atingiram até 4,5 m s⁻¹.

No caso do lisímetro HBM[®], as condições do tempo durante a calibração foram bastante semelhantes àsquelas encontradas na calibração do lisímetro ALFA[®] (Tabela 6). O céu se encontrava aberto e ensolarado, a temperatura variou de 23,6 a 31,5 °C e a umidade de 30,2 a 59,3%. Portanto, a amplitude térmica determinada na estação meteorológica foi de 7,9 °C. Mesmo assim, a amplitude observada no *datalogger* (0,1 °C) e no termohigrômetro (1,3 °C) foi baixa. A velocidade média do vento também foi alta e apresentou médias horárias que atingiram 3,9 m s⁻¹.

Tabela 6 – Condições ambientais durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central, sendo T_{CR1000} a temperatura do *datalogger* (°C), T_{fosso} a temperatura medida no fosso dos lisímetros (°C), T_{ar} a temperatura do ar externo medida na estação meteorológica (°C), UR_{ar} a umidade relativa do ar externo (%), v a velocidade média do vento ($m\ s^{-1}$) e Q_g a radiação solar global ($W\ m^{-2}$)

Data	Hora	T_{CR1000}	T_{fosso}	T_{ar}	UR_{ar}	v	Q_g
Lisímetro ALFA [®]							
05/10/2011	8	21,2	21,3	19,6	69,2	1,2	345
	9	21,6	21,8	23	57,4	2	595
	10	21,6	22,5	25,8	47,7	3,9	799
	11	21,7	23,3	27,8	42,2	4,5	972
	12	21,9	23,4	28,9	39,4	3,7	975
Lisímetro HBM [®]							
08/10/2011	09	...	...	23,6	59,3	1	406
	10	22,4	22,8	26,1	50,1	1,5	566
	11	22,5	23,7	29,6	33,5	3,9	665
	12	22,4	24,1	31,5	30,2	3,7	783
	13	22,4	23,9	30,9	31,5	2,4	315

Nota: ... Dado numérico não disponível.

Com base nas equações de calibração ajustadas, os coeficientes angulares dos diferentes lisímetros se aproximaram de forma distinta daqueles previstos nos cálculos preliminares (Figura 35). O lisímetro ALFA[®] apresentou coeficiente angular de 15.448,9 ($kg\ (mV\ V^{-1})^{-1}$), diferente do esperado de 15.000 ($kg\ (mV\ V^{-1})^{-1}$) em 448,9 ($kg\ (mV\ V^{-1})^{-1}$). Esse desvio em relação ao coeficiente angular esperado foi de, aproximadamente, 3%. No lisímetro HBM[®], o coeficiente angular encontrado de 10.578,3 ($kg\ (mV\ V^{-1})^{-1}$), diferiu do esperado de 10.526,3 ($kg\ (mV\ V^{-1})^{-1}$) em, apenas, 52 ($kg\ (mV\ V^{-1})^{-1}$). Esse desvio representou, apenas, 0,49% se comparado ao coeficiente angular esperado.

Considerando-se os altos coeficientes de determinação obtidos (Figura 35), o modelo de regressão linear descreveu adequadamente a relação entre a massa acumulada e a média do sinal de saída das três células de carga ALFA[®] (0,9996) e HBM[®] (≈ 1), evidenciando o comportamento linear existente entre estas variáveis.

Figura 35 – Ajuste das equações de calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central utilizando células de carga ALFA® (A) e HBM® (B)

Entretanto, embora tenha sido comprovada a linearidade, isso não necessariamente indica que os mesmos sejam exatos ou acurados. Esses conceitos, os quais são

sinônimos, são diferentes do de linearidade, pois representam a capacidade que o modelo ajustado tem de determinar o valor verdadeiro da massa. Assim, alguns erros ocorreram entre a massa determinada por estes e a acumulada sobre os mesmos durante a calibração, implicando em diferentes acurácias entre os lisímetros. Estas acurácias são representadas pelo erro padrão da estimativa do modelo de regressão ajustado.

Ao longo da calibração do lisímetro ALFA[®], os erros observados foram bastante dispersos em torno do zero e variaram de -10,61 kg (-0,88 mm) até 10,12 kg (0,84 mm). Não foi observada tendência de os erros aumentarem ou diminuírem em função da massa acumulada, sendo o valor médio do erro absoluto (independente do seu sinal) igual a 3,96 kg, ou, 0,33 mm (Figura 36). Por outro lado, no lisímetro HBM[®] os erros foram menos dispersos, situando-se mais próximos de zero, sendo observada variação de -3,41 kg (-0,28 mm) até 2,37 kg (0,2 mm). Da mesma forma que para o lisímetro ALFA[®], também não foi observada tendência de os erros aumentarem ou diminuírem em função da massa acumulada, sendo o valor médio do erro absoluto de 0,95 kg, ou, 0,08 mm (Figura 36).

O erro padrão de ambos os lisímetros ficou abaixo do esperado nos cálculos preliminares, indicando serem mais acurados do que o previsto inicialmente. No lisímetro ALFA[®] esta diferença não foi tão acentuada, sendo o erro observado de $\pm 4,79$ kg, ou, $\pm 0,4$ mm e o esperado de $\pm 5,2$ kg, ou, $\pm 0,43$ mm (Figura 35A). No caso do lisímetro HBM[®], o erro observado de $\pm 1,21$ kg, ou, $\pm 0,1$ mm, foi relativamente menor se comparado ao erro esperado de $\pm 3,46$ kg, ou, $\pm 0,29$ mm (Figura 35B). Assim, estes erros representaram, aproximadamente, 92 e 35% do erro máximo esperado nos lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente.

Figura 36 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por pivô central durante a calibração

Conforme pode ser observado na Figura 35A, no lisímetro ALFA[®] houve um ligeiro desvio entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento. Esse desvio indicou a existência de histerese neste lisímetro (Figura 37), com as massas determinadas no descarregamento sendo, em média, 7 kg (0,58 mm) maiores que aquelas determinadas na etapa de carregamento. Por outro lado, o lisímetro HBM[®] apresentou pouca histerese (Figura 37), sendo as massas determinadas no carregamento, em média, 1,1 kg (0,09 mm) maiores que aquelas determinadas no descarregamento.

Figura 37 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central

Na composição do valor médio da massa determinada a cada minuto nos lisímetros, os dados médios de três células de carga foram utilizados. Logo, para cada célula existiu um desvio padrão referente à composição da sua média, a qual se baseou em um total de 30 observações realizadas a cada 2 s. Em ambos os lisímetros, ao longo da calibração os desvios padrão das três células de carga se apresentaram de modo semelhante, não havendo predomínio de uma célula sobre as outras. Portanto, esses dados puderam ser interpretados considerando-se a média do desvio padrão das três células de carga, resultando no desvio padrão do lisímetro, o qual é um indicativo da sua precisão. Entenda-se por precisão a capacidade que o lisímetro tem de apresentar em medidas sucessivas o mesmo valor, mesmo que este não seja exato.

O desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros não apresentou tendência de aumento ou diminuição em função da massa acumulada nos mesmos (Figura 38). Porém, no lisímetro ALFA[®] observou-se a tendência de os desvios padrão serem mais elevados na etapa de descarregamento, se comparado a de carregamento. Em média, o desvio padrão determinado no descarregamento (2,37 kg, ou, 0,2 mm) foi 86% maior que o determinado no carregamento (1,27 kg, ou, 0,11 mm). Essa diminuição da precisão do lisímetro pode ter ocorrido devido ao aumento da velocidade do vento na etapa de descarregamento. Isso pode ter gerado o

turbilhonamento do ar dentro da área protegida pela barreira de ventos e introduzido pequenas oscilações no lisímetro, aumentando o desvio padrão, mas sem influenciar o valor médio. No lisímetro HBM[®], os desvios obtidos entre as etapas de carregamento e descarregamento foram semelhantes, com média de 1 kg (0,08 mm).

Figura 38 – Desvio padrão das massas determinadas nos lisímetros ALFA® (A) e HBM® (B) do tratamento irrigado por pivô central em função da massa acumulada sobre os mesmos durante a calibração

2.3.4.2 Lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento

Durante a calibração do lisímetro ALFA[®], o tempo se encontrava com céu aberto e ensolarado, a temperatura do ar variou entre 24,4 e 27,6 °C e a umidade relativa entre 27,3 e 34,6% (Tabela 7). A amplitude térmica no ar externo foi pequena (3,2 °C), assim como a registrada pelo *datalogger* instalado dentro da caixa selada no túnel de interligação (0,5 °C) e pelo termohigrômetro instalado no fosso, abaixo do lisímetro HBM[®] (1,5 °C). As condições de vento durante a calibração se encontravam moderadas, apresentando valores médios horários que atingiram no máximo 2,1 m s⁻¹.

No caso do lisímetro HBM[®], as condições do tempo durante a calibração foram bastante semelhantes àsquelas encontradas na calibração do lisímetro ALFA[®] (Tabela 7). O céu se encontrava aberto e ensolarado, a temperatura variou de 24,2 a 28,1 °C e a umidade de 30,1 a 45,1%. Portanto, a amplitude térmica determinada na estação meteorológica foi de 3,9 °C. Da mesma forma, valores baixos de amplitude térmica também foram observados no *datalogger* (0,3 °C) e no termohigrômetro (0,4 °C). A velocidade média do vento foi mais alta que a atuante durante a calibração do lisímetro ALFA[®], apresentando médias horárias que atingiram 3,3 m s⁻¹.

Tabela 7 – Condições ambientais durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento, sendo T_{CR1000} a temperatura do *datalogger* (°C), T_{fosso} a temperatura medida no fosso dos lisímetros (°C), T_{ar} a temperatura do ar externo medida na estação meteorológica (°C), UR_{ar} a umidade relativa do ar externo (%), v a velocidade média do vento (m s⁻¹) e Q_g a radiação solar global (W m⁻²)

Data	Hora	T _{CR1000}	T _{fosso}	T _{ar}	UR _{ar}	v	Q _g
Lisímetro ALFA [®]							
21/10/2011	15	20,3	22	27,5	30,3	1,8	765
	16	20,4	21,1	27,6	28,5	1,9	560
	17	20,2	20,6	26,9	27,6	1,6	232
	18	20	20,6	26,7	27,3	1,7	144
	19	19,9	20,5	24,4	34,6	2,1	4
Lisímetro HBM [®]							
22/10/2011	15	20	20,8	28,1	30,1	1,9	602
	16	20,1	21,2	27,7	32,9	2,7	441
	17	20,3	21,2	27	34,5	2,9	268
	18	20,1	21,2	26	37,9	2,8	93
	19	20,1	21,2	24,2	45,1	3,3	2

Com base nas equações de calibração ajustadas, os coeficientes angulares encontrados em ambos os lisímetros se aproximaram bastante daqueles previstos nos cálculos

preliminares (Figura 35). O lisímetro ALFA[®] apresentou coeficiente angular de 15.125,8 (kg (mV V⁻¹)⁻¹), diferente do esperado de 15.000 (kg (mV V⁻¹)⁻¹) em 125,8 (kg (mV V⁻¹)⁻¹). Esse desvio em relação ao coeficiente angular esperado foi de, aproximadamente, 0,84%. No lisímetro HBM[®], o coeficiente angular encontrado de 10.557,9 (kg (mV V⁻¹)⁻¹), diferiu do esperado de 10.526,3 (kg (mV V⁻¹)⁻¹) em, apenas, 31,6 (kg (mV V⁻¹)⁻¹). Esse desvio representou, apenas, 0,3% se comparado ao coeficiente angular esperado.

Altos coeficientes de determinação foram obtidos em ambos os lisímetros (Figura 39), demonstrando que o modelo de regressão linear descreveu adequadamente a relação entre a massa acumulada e a média do sinal de saída das três células de carga ALFA[®] (0,9998) e HBM[®] (≈ 1), evidenciando o comportamento linear existente entre estas variáveis.

Figura 39 – Ajuste das equações de calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento utilizando células de carga ALFA® (A) e HBM® (B)

Na calibração do lisímetro ALFA®, os erros observados foram dispersos em torno do zero e variaram de -5,37 kg (-0,45 mm) até 5,71 kg (0,48 mm). Não foi observada

tendência de os erros aumentarem ou diminuïrem em função da massa acumulada, sendo o valor médio do erro absoluto igual a 2,89 kg, ou, 0,24 mm (Figura 40). Por outro lado, no lisímetro HBM® os erros foram menos dispersos, situando-se mais próximos de zero, sendo observada variação de -1,14 kg (-0,1 mm) até 0,82 kg (0,07 mm). Da mesma forma que para o lisímetro ALFA®, também não foi observada tendência de os erros aumentarem ou diminuïrem em função da massa acumulada, sendo o valor médio do erro absoluto de 0,29 kg, ou, 0,02 mm (Figura 40).

O erro padrão obtido na calibração de ambos os lisímetros ficou abaixo do esperado nos cálculos preliminares, indicando serem mais acurados do que o previsto. No lisímetro ALFA®, o erro observado foi de $\pm 3,26$ kg, ou, $\pm 0,27$ mm, comparado ao esperado de $\pm 5,2$ kg, ou, $\pm 0,43$ mm (Figura 39A). No caso do lisímetro HBM®, o erro observado de $\pm 0,37$ kg, ou, $\pm 0,03$ mm, foi relativamente menor se comparado ao erro esperado de $\pm 3,46$ kg, ou, $\pm 0,29$ mm (Figura 39B). Assim, estes erros representaram, aproximadamente, 63 e 11% do erro máximo esperado nos lisímetros ALFA® e HBM®, respectivamente.

Figura 40 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelos lisímetros ALFA® e HBM® do tratamento irrigado por gotejamento durante a calibração

No lisímetro ALFA® houve um ligeiro desvio entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento, fato que indicou a existência de histerese (Figura 41).

As massas determinadas no descarregamento foram, em média, 5,8 kg (0,48 mm) maiores que aquelas determinadas na etapa de carregamento. Por outro lado, o lisímetro HBM® praticamente não apresentou histerese (Figura 41), sendo que as massas determinadas no carregamento, em média, foram apenas 0,05 kg (0,004 mm) maiores que aquelas determinadas no descarregamento.

Figura 41 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração dos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento

Em ambos os lisímetros, ao longo da calibração os desvios padrão das três células de carga se apresentaram de modo semelhante, não havendo predomínio de uma célula sobre as outras. Portanto, esses dados puderam ser interpretados considerando-se a média do desvio padrão das três células de carga, resultando no desvio padrão do lisímetro.

O desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros não apresentou tendência de aumento ou diminuição em função da massa acumulada nos mesmos (Figura 42). Além disso, em ambos os lisímetros não foi observada tendência de os desvios serem diferentes entre as etapas de carregamento e descarregamento. Ambos apresentaram valores baixos de desvios, sendo a média do lisímetro ALFA® igual a 0,85 kg (0,07 mm) e no lisímetro HBM® igual a 0,87 kg (0,07 mm).

Figura 42 – Desvio padrão das massas determinadas nos lisímetros ALFA® (A) e HBM® (B) do tratamento irrigado por gotejamento em função da massa acumulada sobre os mesmos durante a calibração

2.3.4.3 Lisímetros do tratamento sem irrigação

Durante a calibração do lisímetro ALFA[®], o tempo se encontrava com céu aberto e sol brando, a temperatura do ar variou entre 15,7 e 22,9 °C e a umidade relativa entre 44 e 69,6% (Tabela 8). Embora a amplitude térmica no ar externo tenha sido de 7,2 °C, a temperatura medida pelo *datalogger* instalado dentro da caixa selada no túnel de interligação dos lisímetros variou apenas 0,6 °C. Variação pequena também foi observada para a temperatura determinada pelo termohigrômetro instalado embaixo do lisímetro HBM[®]. Neste, a amplitude térmica foi de 0,8 °C. Durante a calibração o vento apresentou velocidades moderadas, com valores médios horários que atingiram no máximo 2,6 m s⁻¹.

No caso do lisímetro HBM[®] (Tabela 8), o céu se encontrava aberto e ensolarado, com a temperatura variando entre 26,1 e 27,4 °C e a umidade entre 31,5 a 32,9%. A amplitude térmica determinada na estação meteorológica foi baixa (1,3 °C), assim como a determinada no *datalogger* (0,2 °C) e no termohigrômetro (0,3 °C). A velocidade média do vento também foi moderada e apresentou médias horárias que atingiram no máximo 2,7 m s⁻¹.

Tabela 8 – Condições ambientais durante a calibração dos lisímetros do tratamento sem irrigação, sendo T_{CR1000} a temperatura do *datalogger* (°C), T_{fosso} a temperatura medida no fosso dos lisímetros (°C), T_{ar} a temperatura do ar externo medida na estação meteorológica (°C), UR_{ar} a umidade relativa do ar externo (%), v a velocidade média do vento (m s⁻¹) e Q_g a radiação solar global (W m⁻²)

Data	Hora	T _{CR1000}	T _{fosso}	T _{ar}	UR _{ar}	v	Q _g
Lisímetro ALFA [®]							
19/10/2011	07	19,8	19,9	15,7	69,6	1,8	110
	08	20	20,1	17,8	62	2,3	329
	09	20,1	20,3	19,6	55,4	2,6	639
	10	20,2	20,5	21,4	48,5	2,5	841
	11	20,4	20,7	22,9	44	2,2	903
Lisímetro HBM [®]							
19/10/2011	13	20,6	21,1	26,1	32,9	2,2	1.057
	14	20,7	21,2	26,7	32,4	2,3	943
	15	20,7	21,2	27,1	31,5	2,7	803
	16	20,7	21,2	27,4	31,6	2,4	599
	17	20,8	21,4	26,7	32,4	2,3	301

Com base nas equações de calibração ajustadas, os coeficientes angulares dos diferentes lisímetros se aproximaram de forma distinta daqueles previstos nos cálculos preliminares (Figura 43). O lisímetro ALFA[®] apresentou coeficiente angular de 15.848,5 (kg

($\text{mV V}^{-1})^{-1}$), diferente do esperado de 15.000 ($\text{kg (mV V}^{-1})^{-1}$) em 848,5 ($\text{kg (mV V}^{-1})^{-1}$). Esse desvio em relação ao coeficiente angular esperado foi de, aproximadamente, 5,7%. Por outro lado, no lisímetro HBM[®], o coeficiente angular encontrado de 10.554,4 ($\text{kg (mV V}^{-1})^{-1}$), diferiu do esperado de 10.526,3 ($\text{kg (mV V}^{-1})^{-1}$) em, apenas, 28,1 ($\text{kg (mV V}^{-1})^{-1}$). Esse desvio representou, apenas, 0,3% se comparado ao coeficiente angular esperado.

Altos coeficientes de determinação foram obtidos em ambos os lisímetros (Figura 43), demonstrando que o modelo de regressão linear descreveu adequadamente a relação entre a massa acumulada e a média do sinal de saída das três células de carga ALFA[®] (0,9976) e HBM[®] (≈ 1), evidenciando o comportamento linear existente entre estas variáveis.

Figura 43 – Ajuste das equações de calibração dos lisímetros do tratamento sem irrigação utilizando células de carga ALFA® (A) e HBM® (B)

Na calibração do lisímetro ALFA®, os erros observados foram bastante dispersos em torno do zero e variaram de -18,38 kg (-1,53 mm) até 19,32 kg (1,61 mm).

Observou-se uma tendência clara de os erros serem maiores no centro da faixa de calibração do lisímetro, com a diminuição destes em direção as extremidades. O valor médio do erro absoluto foi igual a 11,2 kg, ou, 0,93 mm (Figura 44). Por outro lado, no lisímetro HBM[®] os erros foram menos dispersos, situando-se mais próximos de zero, sendo observada variação de -1,22 kg (-0,1 mm) até 1,13 kg (0,09 mm). Diferentemente do observado para o lisímetro ALFA[®], não foi observada tendência de os erros aumentarem ou diminuírem em função da massa acumulada, sendo o valor médio do erro absoluto de 0,41 kg, ou, 0,03 mm (Figura 44).

O erro padrão da estimativa do modelo de regressão ajustado para o lisímetro ALFA[®] ficou acima do esperado nos cálculos preliminares, indicando que este é menos acurado do que o previsto. Neste lisímetro, o erro padrão observado foi de $\pm 12,42$ kg, ou, $\pm 1,04$ mm, comparado ao esperado de $\pm 5,2$ kg, ou, $\pm 0,43$ mm (Figura 43A). No caso do lisímetro HBM[®], o erro padrão obtido foi menor do que o esperado, indicando que este é mais acurado do que o previsto com base nos cálculos preliminares. O erro observado de $\pm 0,51$ kg, ou, $\pm 0,04$ mm, foi relativamente menor se comparado ao esperado de $\pm 3,46$ kg, ou, $\pm 0,29$ mm (Figura 43B). Assim, o lisímetro ALFA[®] apresentou erro superior ao esperado em 138%, enquanto o lisímetro HBM[®] apresentou erro padrão que representou, aproximadamente, 15% do erro máximo esperado.

Figura 44 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento sem irrigação durante a calibração

Conforme pode ser observado na Figura 43A, no lisímetro ALFA[®] houve muito desvio entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento, sugerindo a existência de histerese no lisímetro (Figura 45), com as massas determinadas no descarregamento sendo, em média, 22,5 kg (1,88 mm) maiores que aquelas determinadas na etapa de carregamento. Por outro lado, o lisímetro HBM[®] praticamente não apresentou histerese (Figura 45), sendo que as massas determinadas no carregamento, em média, foram apenas 0,07 kg (0,006 mm) maiores que aquelas determinadas no descarregamento.

Figura 45 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração dos lisímetros do tratamento sem irrigação

Em ambos os lisímetros, ao longo da calibração os desvios padrão das três células de carga se apresentaram de modo semelhante, não havendo predomínio de uma célula sobre as outras. Portanto, esses dados puderam ser interpretados considerando-se a média do desvio padrão das três células de carga, resultando no desvio padrão do lisímetro.

O desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros não apresentou tendência de aumento ou diminuição em função da massa acumulada nos mesmos (Figura 46). Além disso, em ambos os lisímetros não foi observada tendência de os desvios serem diferentes entre as etapas de carregamento e descarregamento. Também não foi observada diferença nos desvios entre os lisímetros. Ambos apresentaram valores baixos de desvios, sendo a média do lisímetro ALFA[®] igual a 1,05 kg (0,09 mm) e no lisímetro HBM[®] igual a 0,92 kg (0,08 mm).

Figura 46 – Desvio padrão das massas determinadas nos lisímetros ALFA® (A) e HBM® (B) do tratamento sem irrigação em função da massa acumulada sobre os mesmos durante a calibração

2.3.4.3.1 Identificação do problema do lisímetro ALFA[®]

Conforme observado anteriormente, o resultado da calibração do lisímetro ALFA[®] do tratamento sem irrigação não foi adequado, apresentando coeficiente angular alto se comparado ao previsto e aos demais lisímetros ALFA[®], erros elevados em relação à massa real, muita histerese e baixa acurácia. Estes resultados sugeriam a necessidade de uma análise individualizada de cada célula de carga do lisímetro, a fim de encontrar o porquê de tais resultados.

Assim, conforme pode ser observado na Figura 47, o desvio padrão das massas determinadas por cada célula de carga se apresentou de maneira aleatorizada durante a calibração, sem haver uma tendência de predominância de desvios maiores em uma célula em específico. Isso indicou que a precisão das células de carga foi semelhante. Portanto, o ajuste inadequado na calibração do lisímetro não foi devido à variabilidade das sucessivas medidas tomadas a cada 2 s para compor a média, haja vista que a dispersão dessas medidas em torno do valor médio foi semelhante entre as células. A obtenção destes desvios apresentados em unidade de massa foi realizada multiplicando-se o desvio padrão do sinal de saída da célula de carga (mV V^{-1}), pelo coeficiente angular teórico da célula de 5.000 ($\text{kg (mV V}^{-1})^{-1}$), calculado segundo a eq. (6).

Figura 47 – Desvio padrão da massa relacionada às três células de carga durante a calibração do lisímetro ALFA® do tratamento sem irrigação

Na realidade, os resultados inadequados da calibração do lisímetro foram devidos ao mau funcionamento da célula de carga nº 3. Conforme pode ser visto na Figura 48A, esta célula de carga apresentou um desalinhamento muito grande entre a massa determinada no carregamento e descarregamento. Logo, a histerese foi elevada (Figura 48B). Por consequência, a baixa qualidade dos sinais obtidos nesta célula de carga e a sua histerese foram propagados para o resultado final do lisímetro.

Ressalta-se que a descontinuidade da tendência observada para as células no faixa final da calibração deveu-se à concentração de algumas massas padrão num determinado ponto do lisímetro. Isso não gerou nenhum impacto na qualidade da calibração, pois, conforme demonstra a Figura 43A, a linearidade do sinal médio das três células foi mantida devido a uma autocompensação da massa entra as células.

Considerando-se os dados da Figura 48B, a célula de carga nº 1 apresentou, em média, massas no descarregamento 7,6 kg maiores que no carregamento. Na célula nº 2 este valor foi 0,7 kg maior no carregamento. Porém, a célula de carga nº 3 destoou das demais, apresentando massas no descarregamento 14,4 kg maiores que aquelas obtidas no carregamento.

Figura 48 – Massa (A) e histerese (B) relativa a cada célula de carga durante a calibração do lisímetro ALFA[®] do tratamento sem irrigação

Para demonstrar o impacto do erro associado à célula de carga nº 3 na característica final do sistema de pesagem, uma nova calibração do lisímetro foi simulada

considerando-se uma condição teórica. Nesta, o comportamento da célula de carga n° 3 foi ideal com relação à histerese, ou seja, o sinal obtido no carregamento foi idêntico ao obtido no descarregamento (histerese nula). Isso foi conseguido tirando-se a média dos valores obtidos entre estas etapas, e, depois, substituindo os valores destas pelo valor médio calculado.

Com base na equação de calibração ajustada (Figura 49), o coeficiente angular do lisímetro manteve-se alto ($15.881,5 \text{ (kg (mV V}^{-1})^{-1})$), com valor próximo ao obtido na calibração original ($15.848,5 \text{ (kg (mV V}^{-1})^{-1})$). O mesmo aconteceu com o coeficiente de determinação (0,9997), demonstrando que o comportamento linear do modelo foram mantidos.

Figura 49 – Ajuste da equação de calibração do lisímetro ALFA® do tratamento sem irrigação considerando-se o comportamento ideal da célula de carga n° 3

Os erros observados foram menos dispersos em torno do zero se comparado aos obtidos na calibração original (Figura 50). Estes variaram de -8,61 kg (-0,72 mm) até 9,73 kg (0,81 mm). Portanto, essa faixa de erros obtida na nova calibração foi, aproximadamente, 2 vezes menor que a obtida na calibração original. Além disso, foi diminuído a tendência anteriormente observada de os erros serem maiores no centro da faixa de calibração. Assim, a distribuição dos erros foi mais uniforme. O valor médio do erro absoluto foi igual a 3,91 kg (0,33 mm), portanto, 2,9 vezes menor.

O erro padrão obtido de 4,55 kg, ou, 0,38 mm, foi 63,3% menor que o obtido na calibração original. Diferentemente do observado nesta última, o erro padrão da estimativa do modelo de regressão ajustado ficou abaixo do máximo esperado nos cálculos preliminares, indicando que, nesta situação teórica, o lisímetro é mais acurado do que o previsto inicialmente (Figura 49).

Figura 50 – Erro entre a massa acumulada e a determinada pelo lisímetro ALFA® do tratamento sem irrigação durante a calibração, utilizando-se os dados originais (ALFA) e os corrigidos simulando-se o comportamento ideal da célula nº 3 (ALFA corrigida)

Conforme pode ser observado na Figura 49, os desvios entre os pontos obtidos nas etapas de carregamento e descarregamento foram menores que o original (Figura 43A). Ainda assim, houve histerese no lisímetro sob essa condição teórica (Figura 51), sendo as massas determinadas no descarregamento, em média, 7,14 kg maiores que aquelas determinadas no carregamento. Mesmo assim, essa histerese foi, aproximadamente, 3 vezes menos pronunciada que a encontrada na calibração original (Figura 51).

Figura 51 – Histerese entre a massa determinada no carregamento e descarregamento das massas padrão durante a calibração do lisímetro ALFA[®] do tratamento sem irrigação, utilizando-se os dados originais (ALFA) e os corrigidos simulando-se o comportamento ideal da célula nº 3 (ALFA corrigida)

2.3.4.4 Interpretação dos resultados das calibrações

A calibração dos lisímetros não sofreu influência do vento, mesmo aqueles do tratamento irrigado por pivô central, os quais foram calibrados sob condições de velocidade do vento que podem ser consideradas altas. Na calibração destes, valores médios horários da velocidade do vento ultrapassaram, em alguns momentos, o patamar de 3 m s^{-1} , atingindo até $4,5 \text{ m s}^{-1}$. Isso só foi possível graças à existência da barreira de vento que fora construída.

Campeche (2002) não utilizou a barreira de ventos e realizou a calibração dos lisímetros somente sob condições de velocidade do vento menor que 1 m s^{-1} . Segundo o autor, quando se tentou realizar calibrações no período em que ocorreram velocidades de vento maiores, observou-se acentuada histerese nos lisímetros. Os autores recomendaram que os trabalhos de calibração de lisímetros de pesagem sejam evitados quando a velocidade do vento for maior que $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Ao calibrar dois lisímetros de pesagem, Howell et al. (1995) encontraram que o valor médio da velocidade do vento foi $2,3 \text{ m s}^{-1}$. Os autores não utilizaram nenhuma barreira de vento e consideraram esta velocidade como acima do desejável para o trabalho de calibração. Malone et

al. (1999) também não utilizaram barreira de vento, porém, conforme citam os autores, para minimizar a influência do mesmo durante a calibração, os lisímetros somente foram calibrados sob condições de vento que os autores consideraram negligenciável, assim como realizado por Marek et al. (2006). No entanto, estes autores não mencionam qual critério foi utilizado para definir que valor médio de velocidade do vento foi considerado negligenciável. Diferentemente destes, Faria, Campeche e Chibana (2006), assim como no presente estudo, também construíram uma barreira de vento para calibrar dez lisímetros de pesagem e isso permitiu que a calibração destes fosse realizada sob condições de velocidade média do vento de $2,4 \text{ m s}^{-1}$.

No presente estudo, todos os modelos de regressão linear ajustados na calibração dos lisímetros apresentaram coeficientes de determinação elevados, sempre maiores ou iguais a 0,9976 (Tabela 9). Isso demonstrou que a resposta dos sistemas de pesagem à variação de massa obedeceu a um comportamento linear, concordando com Gommola (2000), o qual considera que as células de carga são fabricadas para apresentar dito comportamento. Desta forma, os coeficientes de determinação obtidos foram semelhantes àqueles de outros autores, os quais calibraram lisímetros de pesagem direta (SCHNEIDER et al., 1998; SILVA; FOLEGATTI; MAGGIOTTO, 1999; CAMPECHE, 2002; JIA et al., 2006; MAREK et al., 2006; CARVALHO et al., 2007; PAYERO; IRMAK, 2008; CLAWSON et al., 2009) e lisímetros de pesagem com sistema de redução de massa (MAREK et al., 1988; HOWELL et al., 1995; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006; EVETT et al., 2009; CAMPECHE et al., 2011).

Tabela 9 – Resultados da calibração dos lisímetros, sendo R^2 o coeficiente de determinação (adimensional), b o coeficiente angular ($\text{kg (mV V}^{-1})^{-1}$), a o intercepto (kg), Res a resolução final do lisímetro na determinação da evapotranspiração (mm), ϵ o erro padrão da estimativa do modelo de regressão (mm), H a média da histerese (kg) e DP a média do desvio padrão (kg)

Lisímetro	R^2	b	a	Res	ϵ	H*	DP
Pivô central – ALFA [®]	0,9996	15.448,9	-29.153,6	0,0012	0,4	-7	1,83
Pivô central – HBM [®]	≈ 1	10.578,3	-28.024,9	0,00088	0,1	+1,1	1
Gotejamento – ALFA [®]	0,9998	15.125,8	-28.135,8	0,0013	0,27	-5,8	0,85
Gotejamento – HBM [®]	≈ 1	10.557,9	-28.537,8	0,00088	0,03	+0,05	0,87
Sem irrigação – ALFA [®]	0,9976	15.848,5	-30.245,2	0,0013	1,04	-22,5	1,05
Sem irrigação – HBM [®]	≈ 1	10.554,4	-29.106,8	0,00087	0,04	+0,07	0,92

Nota: * Sinal positivo indica carregamento maior; sinal negativo indica descarregamento maior.

A conversão dos valores de massa para lâmina pode ser obtida pela divisão dos mesmos pela área dos lisímetros (12 m^2).

O símbolo $\approx$ significa “aproximadamente igual a”.

Os coeficientes angulares obtidos foram sempre maiores que o teórico (Tabela 9). O máximo desvio encontrado em relação ao valor esperado foi de 5,7%, o qual foi obtido no lisímetro ALFA[®] do tratamento sem irrigação. Nos demais lisímetros esse desvio foi menor que 3%. Ressalta-se que aqueles obtidos nos lisímetros HBM[®] foram menores que 0,5%, demonstrando maior aderência das especificações técnicas das células de carga com os resultados obtidos.

A constatação de coeficientes angulares que diferem do teórico é normal. Esse desvio do coeficiente angular já foi observado em outros estudos com lisímetros de pesagem direta. Por exemplo, em um dos lisímetros calibrados por Schneider et al. (1988), o coeficiente angular foi 3,1% maior que o teórico. Jia et al. (2006) calibraram três lisímetros e obtiveram coeficientes angulares iguais, os quais diferiram do esperado em, apenas, 0,21%. Payero e Irmak (2008) calibraram dois lisímetros e obtiveram até 20% de diferença entre o coeficiente angular ajustado e o estimado. Além dos lisímetros de pesagem direta, esta constatação também já foi observada em estudos com lisímetros de pesagem que utilizam sistema de redução de massa. Por exemplo, Evett et al. (2009) calibraram um lisímetro e obtiveram coeficiente angular 5,6% superior ao teórico. Marek et al. (1988) também calibraram lisímetros de pesagem com redução de massa e encontraram coeficiente angular 3,2% menor que o teórico. Esses mesmos lisímetros também foram calibrados por Howell et al. (1995), sendo que estes obtiveram coeficientes angulares que divergiram do teórico em no máximo 1,3%. Em Campeche et al. (2011), o coeficiente angular obtido foi 17,2% maior que o teórico. Faria, Campeche e Chibana (2006) calibraram dez lisímetros e obtiveram no máximo 8% de desvio do coeficiente angular estimado.

O intercepto da equação linear variou entre -28.024,9 e -30.245,2 kg (Tabela 9). Este intercepto nada mais representa do que a massa dos lisímetros no início da calibração. Assim, este pode ser excluído da equação, pois o mesmo constitui uma tara que não influencia nos resultados. A sua exclusão permite uma análise mais real da variação de massa dos lisímetros no estudo da evapotranspiração, pois esta pode ser feita na escala de massa que realmente está ocorrendo nos lisímetros. Considerando-se os valores apresentados, após a devida construção, os lisímetros apresentaram, em média, 28.867,4 kg. Este valor se situou bastante próximo do previsto que era 28.500 kg.

Conforme Payero e Irmak (2008), a resolução final de um lisímetro de pesagem na determinação da evapotranspiração pode ser obtida multiplicando-se o coeficiente angular

(Tabela 9), pelo menor valor de incremento que pode ser relatado pelo *datalogger* (neste estudo, $0,000001 \text{ mV V}^{-1}$). Assim, a resolução final dos lisímetros deste estudo foi sempre menor ou igual a $0,0013 \text{ mm}$ e, portanto, adequada para trabalhos de determinação da evapotranspiração em escala horária ou superior, pois nestes intervalos ocorrem taxas de evapotranspiração mais altas que o valor da resolução (Tabela 9). Essa ideia é reforçada por Marek et al. (1988), os quais afirmam ser necessário resoluções menores que $0,05 \text{ mm}$ para estudar a evapotranspiração na escala horária.

Esse nível de resolução obtido somente foi possível devido ao pequeno valor de incremento do *datalogger* utilizado. Por exemplo, se tivesse sido utilizado outro *datalogger* que apresenta o menor valor de incremento de $0,0001 \text{ mV V}^{-1}$ (por exemplo, CR10X ou CR23X, ambos da marca Campbell Scientific®), a resolução média dos lisímetros ALFA® seria de, aproximadamente, $0,13 \text{ mm}$. Esse nível de resolução certamente limitaria o uso dos mesmos para estudos de evapotranspiração horária. No entanto, além do *datalogger*, a relação área/massa do lisímetro também contribuiu para a obtenção de baixos valores de resolução. Isso se deveu ao fato de o fator área ser utilizado como divisor na conversão da resolução em massa para lâmina. Logo, considerando-se um mesmo valor de massa, quanto maior a área do lisímetro, menor a resolução do mesmo em termos de lâmina.

Os valores de resolução obtidos neste estudo foram melhores que os normalmente encontrados na literatura. Payero e Irmak (2008) apresentam a resolução obtida por lisímetros de pesagem de diversos estudos. Nestes, a resolução variou predominantemente entre $0,02$ e $0,05 \text{ mm}$. Esses valores também são apropriados para estudos de evapotranspiração horária, porém, só não foram melhores devido à limitação imposta pelo *datalogger* utilizado.

Conforme mencionado anteriormente, o erro padrão obtido na calibração dos lisímetros (Tabela 9), com exceção do lisímetro ALFA® do tratamento sem irrigação, se situou abaixo do esperado considerando-se as especificações técnicas das células de carga. Este comportamento era esperado, pois a calibração foi realizada em uma pequena faixa de uso das células de carga. Logo, o erro observado nesta faixa tende a ser menor se comparado a aquele que se espera para toda a faixa de utilização das mesmas (GOMMOLA, 2000).

O erro padrão determinado nos lisímetros HBM® variou pouco entre si, diferentemente dos lisímetros ALFA®, os quais variaram bastante (Tabela 9). Além disso, o erro padrão dos lisímetros HBM® foi menor se comparado aos obtidos nos lisímetros ALFA®,

indicando a maior acurácia dos mesmos. Nos lisímetros HBM[®], este foi sempre menor ou igual a 0,1 mm. Por outro lado, nos lisímetros ALFA[®], variou entre 0,27 e 1,04 mm.

Segundo o critério da acurácia do lisímetro, estes valores sugerem que os lisímetros HBM[®] são apropriados para o estudo da evapotranspiração em escala horária ou superior, haja vista que o erro do sistema é normalmente pequeno se comparado aos níveis de evapotranspiração esperados para essas escalas temporais. No entanto, os níveis de exatidão dos lisímetros ALFA[®] sugerem que os mesmos sejam adequados, apenas, para o estudo da evapotranspiração em escala diária ou superior. Isso se justifica devido ao fato de que os erros encontrados por estes lisímetros representam uma parte muito grande da evapotranspiração que pode ocorrer na escala horária. Por exemplo, no início da manhã ou final da tarde, normalmente ocorrem taxas pequenas de evapotranspiração (menores que $0,3 \text{ mm h}^{-1}$). Isso também ocorre em dias nublados. Existe também a possibilidade de não ser possível detectar a ocorrência de evapotranspiração noturna. No caso do pinhão-manso, por exemplo, durante o inverno, ocasião em que se espera uma redução da evapotranspiração devido à abscisão foliar, esses lisímetros também não deverão detectar os valores horários da evapotranspiração adequadamente.

Normalmente acredita-se que os lisímetros de pesagem que utilizam sistemas de redução de massa apresentam acurácia melhor do que pode ser conseguida em lisímetros de pesagem direta. Segundo Howell (2004), a acurácia que normalmente é obtida nestes lisímetros se situa entre 0,02 e 0,05 mm, enquanto que nos de pesagem direta esses valores se situam entre 0,05 e 0,1 mm. Com base nos resultados do presente estudo, demonstrou-se que lisímetros de pesagem direta também podem apresentar bons níveis de exatidão, tal qual nos lisímetros de com sistema de redução de massa. Ressalta-se que, para que isso ocorra, é crucial a escolha correta do *datalogger*, da célula de carga e a maximização da relação área/massa. No presente estudo, a opção pela célula de carga HBM[®] permitiu atingir tais valores de acurácia, porém, o mesmo não foi observado com a célula de carga ALFA[®].

Conforme pode ser observado na Tabela 9, a precisão dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] foram semelhantes, com valores médios de desvio padrão em torno de 1 kg. Conforme mencionado anteriormente, o desvio padrão de 1,83 kg encontrado no lisímetro ALFA[®] do tratamento irrigado por pivô central, foi atribuído à ocorrência de ventos mais acentuados na etapa de descarregamento, os quais aumentaram o desvio padrão das medidas, embora o valor médio não tenha sido influenciado.

Os lisímetros ALFA[®] apresentaram histerese significativa, diferentemente dos lisímetros HBM[®], nos quais a histerese foi próxima da nulidade (Tabela 9). Nos lisímetros ALFA[®], a histerese sempre ocorreu com a massa no descarregamento sendo maior que no carregamento. Os valores médios obtidos variaram de -5,8 a -22,5 kg. Por outro lado, nos lisímetros HBM[®] a histerese sempre resultou em massa maior no carregamento do que no descarregamento. Mesmo assim, em dois lisímetros a histerese foi menor que 0,1 kg, enquanto no terceiro foi de 1,1 kg. Logo, em média, o valor absoluto de histerese observado nos lisímetros ALFA[®] (11,8 kg) foi, aproximadamente, 29 vezes maior que o observado nos lisímetros HBM[®] (0,41 kg). A ocorrência de histerese acentuada nas células de carga ALFA[®] correlacionou-se positivamente com os altos valores de erro padrão, o que justifica a menor acurácia destes lisímetros. Em outros estudos realizados recentemente foi possível a obtenção de baixa histerese, resultando em boas acurácias (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006; MAREK et al., 2006; CLAWSON et al., 2009; EVETT et al., 2009; CAMPECHE et al., 2011).

2.3.5 Avaliação da influência da temperatura nos lisímetros

2.3.5.1 Influência da abertura da porta do fosso de acesso nos lisímetros

Durante a realização dos testes para a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros, observou-se que a abertura da porta do fosso de acesso introduzia erros nas medidas e no desvio padrão das mesmas.

Isso foi observado ao monitorar os lisímetros do tratamento irrigado por pivô central. No dia do monitoramento, entre as 16:40 e as 20:00, a porta do fosso de acesso foi aberta para uma inspeção do sistema de drenagem e para a avaliação preliminar dos dados no próprio visor do *datalogger*. Durante esse período, observou-se que a massa determinada em ambos os lisímetros diminuiu (Figura 52) e o desvio padrão das leituras aumentou (Figura 53).

Figura 52 – Temperatura no fosso monitorada pelo termohigrômetro e a massa dos lisímetros ALFA® (A) e HBM® (B) do tratamento irrigado por pivô central durante o teste de influência da temperatura nos lisímetros

Figura 53 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) do tratamento irrigado por pivô central durante o teste de influência da temperatura nos lisímetros

Conforme pode ser observado na Figura 52, os erros decorrentes da abertura da porta do fosso de acesso não foram devidos à variação da temperatura no fosso dos lisímetros,

pois a ocorrência dos erros foi imediata após a abertura da porta, enquanto a temperatura no fosso diminuiu paulatinamente com o anoitecer. Assim, observa-se que estas variáveis não estiveram correlacionadas.

Desta forma, acredita-se que os erros nos lisímetros tenham sido devidos a uma pequena, mas que existiu, influência da entrada do vento pelo fosso de acesso e que empurrou os lisímetros ao tentar sair pelo espaço existente entre os tanques e a parede de alvenaria. Assim, ao empurrar os tanques, a massa dos lisímetros aplicada nas células de carga foi diminuída (Figura 52). Além disso, como a movimentação de ar é um processo dinâmico que apresenta oscilações ao longo do tempo, a massa determinada nas leituras a cada 2 s também variou conforme a dinâmica do vento. Logo, o desvio padrão das leituras foi aumentado (Figura 53).

Desta forma, os dados obtidos durante a abertura da porta do fosso de acesso foram excluídos da análise. Além disso, recomenda-se que, durante o monitoramento das plantas de pinhão-manso, a abertura da porta do fosso de acesso seja realizada apenas quando necessário, a fim de evitar a introdução de incertezas nas medidas de evapotranspiração.

2.3.5.2 Lisímetros do tratamento irrigado por pivô central

Durante a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central, a temperatura do ar determinada na estação meteorológica variou de 15,4 a 30,3 °C (amplitude de 14,9 °C), a temperatura no fosso dos lisímetros variou de 20,7 a 23,8 °C (amplitude de 3,1 °C) e a temperatura do *datalogger* variou de 20,9 a 22,2 (amplitude de 1,3 °C).

Observa-se na Figura 54 que a massa de ambos os lisímetros apresentou variação ao longo do período. No lisímetro ALFA[®], a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi de 7 kg (0,58 mm). Por outro lado, no lisímetro HBM[®] essa diferença foi menor e igual a 2,1 kg (0,18 mm), evidenciando a sua maior acurácia.

No entanto, ainda que os lisímetros tenham apresentado oscilação da massa, esta oscilação esteve dentro do esperado considerando-se o erro padrão da calibração e o erro máximo admissível, o qual foi calculado segundo as características de cada célula de carga (ANEXO C). Desta forma, não se pode afirmar que os erros de leitura ocorridos foram

influenciados pela variação da temperatura do ar, haja vista que os mesmos se encontraram dentro da margem prevista nas especificações das células de carga.

Mesmo tendo ocorrido a oscilação da massa com o tempo, a sua influência na determinação da evapotranspiração horária e diária foi mínima (Figura 55). Para a análise da evapotranspiração foram utilizadas as médias dos lisímetros determinadas a cada 10 minutos. Assim, chamou-se de “evapotranspiração virtual” a variação da massa determinada no lisímetro no intervalo de interesse, ou seja, horário ou diário. Essa “evapotranspiração virtual” consiste no erro que ocorreria na determinação da evapotranspiração real, devido ao erro do lisímetro dentro daquele intervalo de tempo. Por exemplo, se durante uma hora a evapotranspiração real da cultura for de 0,4 mm e a “evapotranspiração virtual” for de -0,1 mm, o valor de evapotranspiração a ser relatado pelo lisímetro seria de 0,3 mm.

Conforme a Figura 55A, a “evapotranspiração virtual” determinada em escala horária ocorreu de forma aleatória em ambos os lisímetros, sem haver uma tendência clara. No lisímetro ALFA[®], a “evapotranspiração virtual” variou de -0,13 a 0,16 mm hora⁻¹, enquanto no lisímetro HBM[®], variou de -0,07 a 0,08 mm hora⁻¹. A média do valor absoluto da “evapotranspiração virtual” foi de 0,05 e 0,03 mm hora⁻¹ para os lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente. Da mesma forma que para a escala horária, na Figura 55B observa-se que a “evapotranspiração virtual” determinada em escala diária foi mínima em ambos os lisímetros, apresentando valores de 0,17 e 0,04 mm dia⁻¹ para os lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente.

Figura 54 – Massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) comparada com as temperaturas determinadas na estação meteorológica (Temp Est), pelo termohigrômetro no fosso dos lisímetros (Temp Fosso) e pelo datalogger (Temp CR1000) durante um dia para a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central

Figura 55 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por pivô central na evapotranspiração horária (A) e diária (B)

2.3.5.3 Lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento

Durante a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento, a temperatura do ar determinada na estação meteorológica variou de 15,6 a 31,2 °C (amplitude de 15,6 °C), a temperatura no fosso dos lisímetros variou de 20,1 a 22,1 °C (amplitude de 2 °C) e a temperatura do *datalogger* variou de 19,7 a 20,6 (amplitude de 0,9 °C).

Observa-se na Figura 56 que a massa de ambos os lisímetros apresentou variação ao longo do período. No lisímetro ALFA[®], a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi de 6,4 kg (0,53 mm). Diferentemente, no lisímetro HBM[®] essa diferença foi menor e igual a 1,9 kg (0,16 mm), evidenciando a sua maior acurácia.

A oscilação observada no lisímetro ALFA[®] apresentou-se dentro do esperado conforme o erro padrão da calibração e o erro máximo admissível do lisímetro. Porém, no lisímetro HBM[®] essa oscilação apresentou-se dentro do esperado para o erro máximo admissível do lisímetro, mas variou acima do erro padrão da calibração. Isso não constitui um problema do lisímetro, pois, na realidade, os fatores que geram erros nas células de carga são maiores do que aqueles que conseguem ser testados durante a calibração. Assim, apesar de a calibração ter resultado em erro padrão muito baixo ($\pm 0,37$ kg), ao longo do tempo os erros podem variar acima destes, mas sempre dentro do previsto nas especificações das células de carga. Desta forma, não se pode afirmar que os erros de leitura ocorridos em ambos os lisímetros foram influenciados pela variação da temperatura do ar, haja vista que os mesmos se encontraram dentro da margem prevista nas especificações das células de carga.

Figura 56 – Massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) comparada com as temperaturas determinadas na estação meteorológica (Temp Est), pelo termohigrômetro no fosso dos lisímetros (Temp Fosso) e pelo *datalogger* (Temp CR1000) durante dois dias consecutivos para a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento

Mesmo tendo sido observada a oscilação da massa com o tempo, a sua influência na determinação da evapotranspiração horária e diária dos lisímetros foi mínima (Figura 57). Conforme a Figura 57A, a “evapotranspiração virtual” determinada em escala horária ocorreu de forma aleatória em ambos os lisímetros, sem haver uma tendência clara. No lisímetro ALFA[®], essa “evapotranspiração virtual” variou de -0,13 a 0,06 mm hora⁻¹, enquanto no lisímetro HBM[®], variou de -0,05 a 0,04 mm hora⁻¹. A média do valor absoluto da “evapotranspiração virtual” horária foi de 0,03 e 0,02 mm hora⁻¹ para os lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente. Da mesma forma que para a escala horária, na Figura 57B observa-se que a “evapotranspiração virtual” determinada em escala diária foi mínima em ambos os lisímetros, com valores -0,03 e -0,24 mm dia⁻¹ no lisímetro ALFA[®] e -0,07 e 0,01 mm dia⁻¹ no lisímetro HBM[®].

Figura 57 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por gotejamento na evapotranspiração horária (A) e diária (B)

2.3.5.4 Lisímetros do tratamento sem irrigação

Durante a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento sem irrigação, a temperatura do ar determinada na estação meteorológica variou de 17,8 a 34 °C (amplitude de 16,2 °C), a temperatura no fosso dos lisímetros variou de 20,7 a 23,3 °C (amplitude de 2,6 °C) e a temperatura do *datalogger* variou de 21,3 a 22,4 (amplitude de 1,1 °C). No teste destes lisímetros houve chuva a partir das 20h10min e portanto os dados deste período foram excluídos da análise.

A massa de ambos os lisímetros apresentou variação ao longo do período de análise (Figura 58). No lisímetro ALFA[®], a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi de 3,8 kg (0,32 mm), valor este próximo daquele obtido no lisímetro HBM[®] de 3 kg (0,25 mm).

No entanto, ainda que os lisímetros tenham apresentado oscilação da massa, esta oscilação esteve dentro do esperado considerando-se o erro padrão da calibração e o erro máximo admissível. Desta forma, não se pode afirmar que os erros de leitura ocorridos foram influenciados pela variação da temperatura do ar, haja vista que os mesmos se encontraram dentro da margem prevista nas especificações das células de carga.

Mesmo tendo sido observada a oscilação da massa com o tempo, a sua influência na determinação da evapotranspiração horária e diária dos lisímetros foi mínima (Figura 59). Conforme a Figura 59A, a “evapotranspiração virtual” determinada em escala horária ocorreu de forma aleatória em ambos os lisímetros, sem haver uma tendência clara. No lisímetro ALFA[®], essa “evapotranspiração virtual” variou de -0,11 a 0,11 mm hora⁻¹, enquanto no lisímetro HBM[®], variou de -0,09 a 0,08 mm hora⁻¹. A média do valor absoluto da “evapotranspiração virtual” horária foi de 0,05 e 0,03 mm hora⁻¹ para os lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente. Da mesma forma que para a escala horária, na Figura 59B observa-se que a “evapotranspiração virtual” determinada em escala diária foi mínima em ambos os lisímetros, apresentando valores de 0,11 e 0,06 mm dia⁻¹ para os lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente.

Figura 58 – Massa dos lisímetros ALFA® (A) e HBM® (B) comparada com as temperaturas determinadas na estação meteorológica (Temp Est), pelo termohigrômetro no fosso dos lisímetros (Temp Fosso) e pelo datalogger (Temp CR1000) durante um dia para a avaliação da influência da temperatura nos lisímetros do tratamento sem irrigação

Figura 59 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento sem irrigação na evapotranspiração horária (A) e diária (B)

2.3.6 Avaliação da influência do vento nos lisímetros

Conforme explicado anteriormente, o teste dos lisímetros quanto a sua sensibilidade ao vento foi realizado simultaneamente em todos os lisímetros, durante seis dias consecutivos.

Neste teste foram excluídos os dados obtidos no período entre às 08h20min e 09h20min do quarto dia de avaliação. Essa exclusão deveu-se a falha de dados ocorrida na estação meteorológica, fato que impossibilitou a comparação dos lisímetros com a velocidade do vento, a qual não foi registrada na estação.

Além disso, no mesmo dia foram excluídos os dados entre às 15h30min e 19h50min devido à inspeção dos lisímetros e avaliação dos dados realizada diretamente no visor do *datalogger*. Logo foi necessário realizar a abertura da porta do fosso de acesso e, conforme explicado anteriormente, isso influenciou as medidas obtidas e o desvio padrão das mesmas.

Por fim, no lisímetro HBM[®] do tratamento sem irrigação, foram excluídos da análise os dados obtidos nos dois últimos dias. Verificou-se que houve transbordamento de água pelos suspiros da drenagem, devido ao enchimento dos reservatórios. Logo, o lisímetro em questão não representou neste período a condição de massa constante necessária para a realização do teste.

Durante o período de teste o valor médio da velocidade média do vento foi de $1,43 \text{ m s}^{-1}$, variando de $0,15$ a $3,54 \text{ m s}^{-1}$. Esses valores estão em conformidade com aqueles que normalmente são encontrados ao longo do ano em Piracicaba-SP. A média da velocidade máxima foi de $2,83 \text{ m s}^{-1}$, variando de $0,34$ a $8,66 \text{ m s}^{-1}$.

2.3.6.1 Lisímetros do tratamento irrigado por pivô central

Observa-se na Figura 60 que a massa dos lisímetros apresentou variação ao longo do período de teste, sendo que no lisímetro ALFA[®], a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi de 11 kg (0,92 mm), enquanto no lisímetro HBM[®] essa diferença foi menor e igual a 6,7 kg (0,56 mm), evidenciando a sua maior acurácia.

A oscilação de massa observada em ambos os lisímetros fez com que fossem extrapolados os limites previstos pelo erro padrão da calibração e o erro máximo admissível, o qual foi calculado segundo as características de cada célula de carga (ANEXO C).

No entanto, essa extrapolação do erro máximo admissível ocorreu em apenas alguns pontos isolados, não sendo observado como um erro frequente, fato que não justifica atribuí-lo a um defeito das células de carga, mas sim ao efeito aleatório de outros fatores que não foram controlados. Portanto, com base nesses dados, não se pode afirmar que os erros de leitura ocorridos foram influenciados pela variação da velocidade média do vento.

Figura 60 – Massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) comparada com a velocidade média do vento durante um seis dias consecutivos para a avaliação da sua influência nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central

Embora a acurácia e o valor médio da massa determinada pelos lisímetros não tenha sido influenciada pelo vento, observou-se que o desvio padrão da massa aumentou linearmente com a velocidade média do vento em ambos os lisímetros (Figura 61), indicando que as sucessivas medidas tomadas a cada 2 s apresentaram maior dispersão em torno da média. Portanto, constatou-se que a precisão dos lisímetros foi reduzida com o aumento da velocidade média do vento.

Observou-se ainda, que o coeficiente angular da regressão linear ajustada entre o desvio padrão dos lisímetros e a velocidade média do vento, foi maior para o lisímetro ALFA[®] se comparado ao HBM[®]. Isso indicou que o aumento da velocidade média do vento provocou maior redução na precisão do lisímetro ALFA[®] do que no HBM[®].

Figura 61 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por pivô central durante o teste de influência do vento

Assim como obtido no teste de sensibilidade a temperatura, a influência da oscilação da massa dos lisímetros na determinação da evapotranspiração horária e diária foi mínima (Figura 62). Conforme a Figura 62A, a “evapotranspiração virtual” determinada em escala horária ocorreu de forma aleatória em ambos os lisímetros, sem haver uma tendência clara. No lisímetro ALFA[®], essa “evapotranspiração virtual” variou de -0,18 a 0,26 $mm\ hora^{-1}$,

enquanto no lisímetro HBM[®], variou de -0,21 a 0,18 mm hora⁻¹. A média do valor absoluto da “evapotranspiração virtual” horária foi de 0,06 mm hora⁻¹ para ambos os lisímetros. Da mesma forma que para a escala horária, na Figura 62B observa-se que a “evapotranspiração virtual” determinada em escala diária foi mínima em ambos os lisímetros, com valores de -0,13 a 0,38 mm dia⁻¹ no lisímetro ALFA[®] e -0,18 a 0,24 mm dia⁻¹ no lisímetro HBM[®].

Figura 62 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por pivô central na evapotranspiração horária (A) e diária (B)

2.3.6.2 Lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento

Conforme a Figura 63, a massa dos lisímetros apresentou variação ao longo do período de teste, sendo que no lisímetro ALFA[®], a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi de 13 kg (1,08 mm), enquanto no lisímetro HBM[®] essa diferença foi menor e igual a 5,3 kg (0,44 mm), evidenciando a sua maior acurácia.

A oscilação de massa observada no lisímetro ALFA[®] fez com que fossem extrapolados os limites previstos pelo erro padrão da calibração e o erro máximo admissível. No lisímetro HBM[®], a oscilação resultou em extrapolação apenas do limite previsto no erro padrão, sendo preservado o limite previsto nas características da célula de carga.

Da mesma forma que observado nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central, a extrapolação do erro máximo admissível no lisímetro ALFA[®] ocorreu em apenas alguns pontos isolados, não sendo observado como um erro frequente, fato que não justifica atribuí-lo a um defeito das células de carga, mas sim ao efeito aleatório de outros fatores que não foram controlados. Portanto, com base nesses dados, em ambos os lisímetros não se pode afirmar que os erros de leitura ocorridos foram influenciados pela variação da velocidade média do vento.

Figura 63 – Massa dos lisímetros ALFA® (A) e HBM® (B) comparada com a velocidade média do vento durante um seis dias consecutivos para a avaliação da sua influência nos lisímetros do tratamento irrigado por gotejamento

Ainda que a acurácia e o valor da média da massa determinada pelos lisímetros não tenha sido influenciada pelo vento, observou-se que o desvio padrão da massa aumentou linearmente com a velocidade média do vento em ambos os lisímetros (Figura 64), indicando que as sucessivas medidas tomadas a cada 2 s apresentaram maior dispersão em torno da média. Portanto, da mesma forma que encontrado nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central, constatou-se que a precisão dos lisímetros foi reduzida com o aumento da velocidade média do vento. Além disso, o aumento da velocidade média do vento provocou maior redução na precisão do lisímetro ALFA[®] do que no HBM[®].

Figura 64 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por gotejamento durante o teste de influência do vento

Da mesma forma que obtido no teste de sensibilidade a temperatura, a influência da oscilação da massa dos lisímetros na determinação da evapotranspiração horária e diária foi mínima (Figura 65). A “evapotranspiração virtual” determinada em escala horária (Figura 65A) ocorreu de forma aleatória em ambos os lisímetros, sem haver uma tendência clara. No lisímetro ALFA[®], a mesma variou de $-0,23$ a $0,15 \text{ mm hora}^{-1}$, enquanto no lisímetro HBM[®], variou de $-0,11$ a $0,13 \text{ mm hora}^{-1}$. A média do valor absoluto da “evapotranspiração virtual” horária foi de $0,06$ e $0,04 \text{ mm hora}^{-1}$ para os lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente. Da

mesma forma que para a escala horária, observa-se na Figura 65B que a “evapotranspiração virtual” determinada em escala diária foi mínima em ambos os lisímetros, com valores de -0,34 a 0,07 mm dia⁻¹ no lisímetro ALFA[®] e -0,2 a 0,06 mm dia⁻¹ no lisímetro HBM[®].

Figura 65 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento irrigado por gotejamento na evapotranspiração horária (A) e diária (B)

2.3.6.3 Lisímetros do tratamento sem irrigação

A massa dos lisímetros variou ao longo do período de teste (Figura 66), sendo que no lisímetro ALFA[®], a diferença entre o valor máximo e o mínimo foi de 11,5 kg (0,96 mm), enquanto no lisímetro HBM[®] essa diferença foi menor e igual a 5,1 kg (0,43 mm), evidenciando a maior acurácia do lisímetro HBM[®].

A oscilação de massa observada no lisímetro ALFA[®] fez com que fosse extrapolado o limite do erro máximo admissível (Figura 66A). O limite previsto pelo erro padrão da calibração não foi superado, porém, conforme explicado anteriormente, este foi muito alto devido a presença de uma célula de carga com acentuada histerese na composição do sistema de pesagem, o que diminuiu muito a acurácia do lisímetro. Por outro lado, no lisímetro HBM[®] (Figura 66B), a oscilação resultou em extrapolação apenas do limite previsto no erro padrão, sendo preservado o limite previsto nas características da célula de carga.

Portanto, assim como para os demais lisímetros dos outros tratamentos, nos lisímetros do tratamento sem irrigação não foi possível afirmar que os erros de leitura ocorridos foram influenciados pela variação da velocidade média do vento.

Figura 66 – Massa dos lisímetros ALFA[®] (A) e HBM[®] (B) comparada com a velocidade média do vento durante um seis dias consecutivos para a avaliação da sua influência nos lisímetros do tratamento sem irrigação

Mesmo que a acurácia e o valor da média da massa determinada pelos lisímetros não tenha sido influenciada pelo vento, assim como para os demais lisímetros dos

outros tratamentos, observou-se que o desvio padrão da massa aumentou linearmente com a velocidade média do vento em ambos os lisímetros do tratamento sem irrigação (Figura 67). Portanto, da mesma forma que encontrado nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central e gotejamento, constatou-se que a precisão dos lisímetros do tratamento sem irrigação foi reduzida com o aumento da velocidade média do vento. Também, o aumento da velocidade média do vento provocou maior redução na precisão do lisímetro ALFA[®] do que no HBM[®].

Figura 67 – Desvio padrão da massa determinada pelos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento sem irrigação durante o teste de influência do vento

Assim como obtido nos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central e gotejamento, a influência da oscilação da massa na determinação da evapotranspiração horária e diária foi mínima (Figura 68). A “evapotranspiração virtual” determinada em escala horária (Figura 68A) ocorreu de forma aleatória em ambos os lisímetros, sem haver uma tendência clara. No lisímetro ALFA[®], a mesma variou de -0,29 a 0,32 mm hora⁻¹, enquanto no lisímetro HBM[®], variou de -0,15 a 0,19 mm hora⁻¹. A média do valor absoluto da “evapotranspiração virtual” horária foi de 0,07 e 0,05 mm hora⁻¹ para os lisímetros ALFA[®] e HBM[®], respectivamente. Da mesma forma que para a escala horária, observa-se na Figura 68B que a “evapotranspiração

virtual” determinada em escala diária foi mínima em ambos os lisímetros, com valores de -0,21 a 0,27 mm dia⁻¹ no lisímetro ALFA[®] e 0 a 0,06 mm dia⁻¹ no lisímetro HBM[®].

Figura 68 – “Evapotranspiração virtual” decorrente do erro dos lisímetros ALFA[®] e HBM[®] do tratamento sem irrigação na evapotranspiração horária (A) e diária (B)

2.3.7 Melhorias recomendadas para os lisímetros

Apesar da qualidade dos lisímetros que foram construídos no presente estudo ter sido comprovada pelos dados obtidos, algumas melhorias podem ainda ser realizadas. Assim, com o objetivo de melhorar os lisímetros para atender ao projeto de estudo da evapotranspiração do pinhão-mansão, seguem algumas recomendações que podem ser úteis:

- Instalar um sistema automático para acionar a drenagem dos lisímetros. Este pode ser programado para realizar automaticamente a abertura do sistema por, aproximadamente, 15 minutos durante as madrugadas. Este tempo deverá ser mais que suficiente para esvaziar os reservatórios. Dessa forma, a drenagem não será confundida com a evapotranspiração e será minimizado o risco de enchimento dos reservatórios;
- Caso seja instalado o sistema automático de drenagem, os lisímetros também poderão ser utilizados para estudar a drenagem na escala diária, haja visto que esta será realizada diariamente durante as madrugadas e será medida pelo lisímetro;
- Substituir a célula de carga ALFA[®] nº 3 do lisímetro do tratamento sem irrigação, pois esta apresentou histerese acentuada;
- Se possível, calibrar novamente este lisímetro após a substituição da célula de carga;
- Instalar um pluviômetro ao lado dos lisímetros do tratamento irrigado por pivô central. A instalação deste permitirá a determinação da lâmina de irrigação aplicada nos lisímetros, bem como o momento exato em que a lâmina foi aplicada. A irrigação também deverá ser determinada pelos lisímetros, porém, no balanço hídrico do lisímetro poderá ocorrer simultaneamente a evapotranspiração e a irrigação. Assim, o pluviômetro poderá servir de referência para permitir fechar o balanço. Além disso, servirá também para determinar a precipitação, podendo ser utilizado juntamente com o pluviômetro da estação meteorológica;
- Embora não tenha sido identificado necessidade de fechar o espaço entre a alvenaria e o tanque dos lisímetros, este poderá ser fechado de alguma maneira para evitar a entrada de animais indesejáveis.

3 CONCLUSÕES

Os seis lisímetros de pesagem direta construídos neste estudo apresentaram qualidade suficiente para determinar a evapotranspiração nas escalas horária e diária.

Os lisímetros ALFA[®] apresentaram resolução final na determinação da evapotranspiração de, aproximadamente, 0,0013 mm, com boa precisão, apresentando histerese e baixa acurácia, a qual foi justificada pelo erro padrão da calibração que variou de 0,27 a 1,04 mm. Os lisímetros demonstraram poder determinar a evapotranspiração sem nenhuma influência da temperatura do ar e do vento. No entanto, a precisão das medidas diminuiu com o aumento da velocidade do vento.

Os lisímetros HBM[®] apresentaram resolução final na determinação da evapotranspiração de, aproximadamente, 0,00088 mm, com boa precisão, pouca ou nenhuma histerese e alta acurácia, a qual foi justificada pelo erro padrão da calibração que variou de 0,03 a 0,1 mm. Os lisímetros também demonstraram poder determinar a evapotranspiração sem nenhuma influência da temperatura do ar e do vento. No entanto, a precisão das medidas também diminuiu com o aumento da velocidade do vento, porém com menor intensidade que os lisímetros ALFA[®].

REFERÊNCIAS

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

ACHTEN, W.M.J.; VERCHOT, L.; FRANKEN, Y.J.; MATHIJS, E.; SINGH, V.P.; AERTS, R.; MUYS, B. Jatropha bio-diesel production and use. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 32, p. 1063-1084, 2008.

ALLEN, R.G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 2, p. 97-106, 1996.

_____. **REF-ET 2.0**: reference evapotranspiration calculation software. Kimberly, 2000. Disponível em: < <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/> >. Acesso em: 19 fev. 2007.

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, 1991. p. 114-124.

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. Environmental requirements for lysimeters. 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, 1991. p. 170-181.

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

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, 1991. 444 p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J.L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 1, p. 2-13, 2005.

ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L.; PRUITT, W.O.; PEREIRA, L.S.; JENSEN, M.E. Water requirements. In: HOFFMAN, G.J.; EVANS, R.G.; JENSEN, M.E.; MARTIN, D.L.; ELLIOTT, R.L. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. 2nd ed. St. Joseph: ASABE, 2007. p. 208-288.

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; WRIGHT, J.L.; HOWELL, T.A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J.B.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; PERRIER, A.; ALVES, I.; WALETR, I.; ELLIOTT, R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, n. 1/2, p. 1-22, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Measurement and reporting practices for automatic agricultural weather stations**. St. Joseph, 2004. 21 p. (Engineering Practices, 505)

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES INSTITUTE. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Reston: ASCE, 2005. 216 p.

ANDRADE, G.A.; CARAMORI, P.H.; SOUZA, F.S.; MARUR, C.J.; RIBEIRO, A.M.A. Temperatura mínima letal para plantas jovens de pinhão-manso. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 799-803, 2008.

ARRUDA, F.P.; BELTRÃO, N.E.M.; ANDRADE, A.P.; PEREIRA, W.E.; SEVERINO, L.S. Cultivo de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 789-799, 2004.

ASSAD, E.D.; MARIN, F.R.; EVANGELISTA, S.R.; PILAU, F.G.; FARIAS, J.R.B.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J. Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 615-625, 2007.

BELTRÃO, N.E.M.; SEVERINO, L.S.; VELOSO, J.F.; JUNQUEIRA, N.; FIDELIS, M.; GONÇALVES, N.P.; SATURNINO, H.M.; ROSCOE, R.; GAZZONI, D.; DUARTE, J.O.; DRUMOND, M.A.; ANJOS, J.B. **Alerta sobre o plantio de pinhão manso no Brasil**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 15 p. (Documentos, 155).

BERNDES, G. Bioenergy and water – the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. **Global Environmental Change**, Guildford, v. 12, p. 253-271, 2002.

BOS, M.G.; KSELIK, R.A.L.; ALLEN, R.G.; MOLDEN, D. **Water requirements for irrigation and the environment**. New York: Springer, 2009. 174 p.

BOUYOUCOS, G.J. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, n. 3, p. 464-465, 1962.

BRITTAINE, R.; LUTALADIO, N. **Jatropha**: a smallholder bioenergy crop. Rome: FAO, 2010. 114 p. (Integrated Crop Management, 8-2010).

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

BURGESS, S.S.O.; ADAMS, M.A.; TURNER, N.C.; BEVERLY, C.R.; ONG, C.K.; KHAN, A.A.H.; BLEBY, T.M. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. **Tree Physiology**, Oxford, v. 21, n. 9, p. 589-598, 2001.

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.)**. 2002. 67 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 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.

CARVALHO, D.F.; 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**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, 2007.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_436.html>. Acesso em: 16 nov. 2011.

CLAWSON, E.L.; HRIBAL, S.A.; PICCINNI, G.; HUTCHINSON, R.L.; ROHLI, R.V.; THOMAS, D.L. Weighing lysimeters for evapotranspiration research on clay soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 4, p. 836-840, 2009.

CUNHA, G.R.; BARNI, N.A.; HAAS, J.C.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PIRES, J.L.F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Zoneamento Agrícola, Passo Fundo, v. 9, n. esp. 3, p. 446-459, 2001a.

CUNHA, G.R.; HASS, J.C.; MALUF, J.R.T.; CARAMORI, P.H.; ASSAD, E.D.; BRAGA, H.J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAZZAROTTO, C.; GONÇALVES, S.; WREGE, M.; BRUNETTA, D.; DOTTO, S.R.; PINTO, H.S.; BRUNINI, O.; THOMÉ, V.M.R.; ZAMPIERI, S.L.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PANDOLFO, C. Zoneamento agrícola e época de semeadura para trigo no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Zoneamento Agrícola, Passo Fundo, v. 9, n. esp. 3, p. 400-414, 2001b.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.W. Pressure plate extractor. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 4 - Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 688-690. (Soil Science Society of America Book Series, 5).

DRANSKI, J.A.L.; PINTO JÚNIOR, A.S.; STEINER, F.; ZOZ, T.; MALAVASI, U.C.; MALAVASI, M.M.; GUIMARÃES, V.F. Physiological maturity of seeds and colorimetry of fruits of *Jatropha curcas* L. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 32, n. 4, p. 158-165, 2010.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

_____. **Cultivo da mandioca para o estado do Amapá**. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_amapa/semes.htm. Acesso em: 15 nov. 2011.

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.

FAIRLESS, D. The little shrub that could – maybe. **Nature**, London, v. 449, p. 652-655, 2007.

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, L.F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FERRI, M.G. **Botânica**: morfologia externa das plantas (organografia). 15. ed. São Paulo: Nobel, 1983. 148 p.

FISHER, D.K.; ALLEN, R.G. Accuracies of lysimeter data acquisition systems. 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, 1991. p. 406-415.

FOIDL, N.; FOIDL, G.; SANCHEZ, M.; MITTELBAACH, M.; HACKEL, S. *Jatropha curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua. **Bioresource Technology**, Essex, v. 58, p. 77-82, 1996.

FRAITURE, C.; GIORDANO, M.; LIAO, Y. Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy. **Water Policy**, London, v. 10, suppl. 1, p. 67-81, 2008.

FRANCIS, G.; EDINGER, R.; BECKER, K. A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. **Natural Resources Forum**, New York, v. 29, p. 12-24, 2005.

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

GREBET, P.; CUENCA, R.H. History of lysimeter design and effects of environmental disturbances. 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, 1991. p. 10-18.

GUSH, M.B. Measurement of water-use by *Jatropha curcas* L. using the heat-pulse velocity technique. **Water SA**, Pretoria, v. 34, n. 5, p. 579-584, 2008.

HELLER, J. **Physic nut: *Jatropha curcas* L.** Rome: IPGRI, 1996. 66 p.

HENNING, R.K. **The *Jatropha* system**: an integrated approach of rural development. Disponível em: <<http://www.jatropha.pro/PDF%20bestanden/The%20Jatropha%20Book-2009%20henning.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2009.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HOLL, M.A.; GUSH, M.B.; HALLOWES, J.; VERSFELD, D.B. ***Jatropha curcas* in South Africa**: an assessment of its water use and bio-physical potential. Pretoria: WRC, 2007. 154 p. (WRC Report, 1497/1/07)

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

HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; JENSEN, M.E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. 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, 1991. p. 1-9.

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.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 360 p. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice).

JIA, X.; DUKES, M.D.; JACOBS, J.M.; IRMAK, S. Weighing lysimeters for evapotranspiration research in a humid environment. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 49, n. 2, p. 1-12, 2006.

JOHNSON, N.; REVENGA, C.; ECHEVERRIA, J. Managing water for people and nature. **Science**, Washington, v. 292, n. 5519, p. 1071-1072, 2001.

JONGSCHAAP, R.E.E.; CORRÉ, W.J.; BINDRABAN, P.S.; BRANDENBURG, W.A. **Claims and facts on *Jatropha curcas* L.** Wageningen: Plant Research International, 2007. 66 p. (Report, 158).

KHEIRA, A.A.A.; ATTA, N.M.M. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficits: yield, water use efficiency and oilseed characteristics. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, p. 1343-1350, 2009.

KIRKHAM, M.B. **Principles of soil and plant water relations**. San Diego: Elsevier, 2005. 500 p.

KLINE, S.J.; McCLINTOCK, F.A. Describing uncertainties in single sample experiments. **Mechanical Engineering**, New York, v. 75, p. 3-8, 1953.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

KUMAR, A.; SHARMA, S. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): a review. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 28, p. 1-10, 2008.

LAPOLA, D.M.; PRIESS, J.A.; BONDEAU, A. Modeling the land requirements and potential productivity of sugarcane and jatropha in Brazil and India using the LPJmL dynamic global vegetation model. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, p. 1087-1095, 2009.

LASCANO, R.J. The soil-plant-atmosphere system and monitoring technology. In: LASCANO, R.J.; SOJKA, R.E. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, 2007. p. 85-115.

LASCANO, R.J.; SOJKA, R.E. Preface. In: _____. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**. Madison: American Society of Agronomy, 2007. p. ix-x.

LAVIOLA, B.G.; DIAS, L.A.S. Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 5, p. 1969-1975, 2008.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3. ed. Campinas: SBCS, 1996. 84 p.

LI, Z.; LIN, B. L.; ZHAO, X.; SAGISAKA, M.; SHIBAZAKI, R. System approach for evaluating the potential yield and plantation of *Jatropha curcas* L. on a global scale. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 44, n. 6, p. 2204-2209, 2010.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 344 p.

MAES, W.H.; TRABUCCO, A.; ACHTEN, W.M.J.; MUYS, B. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, p. 1481-1485, 2009.

MAKKAR, H.P.S.; BECKER, K. *Jatropha curcas*, a promising crop for the generation of biodiesel and value-added coproducts. **European Journal of Lipid Science and Technology**, Weinheim, v. 111, p. 773-787, 2009.

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.H.; SCHNEIDER, A.D.; HOWELL, T.A.; EBELING, L.L. Design and construction of large weighing monolithic lysimeters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 2, p. 477-484, 1988.

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.

MONTEITH, J.L. Evaporation and the environment. In: FOGG, G.E. (Ed.). **The state and movement of water in living organisms**. Cambridge: Cambridge University Press, 1965. p. 205-234.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

NUNES, C.F.; SANTOS, D.N.; PASQUAL, M.; VALENTE, T.C.T. Morfologia externa de frutos, sementes e plântulas de pinhão-mansão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 207-210, 2009.

OPENSHAW, K. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 19, p. 1-15, 2000.

PAN, B.; XU, Z. Benzyladenine treatment significantly increases the seed yield of the biofuel plant *Jatropha curcas*. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 30, p. 166-174, 2011.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; FLUMIGNAN, D.L.; ZOLIN, C.A.; BARBOZA JUNIOR, C.R.A.; PIEDADE, S.M.S. Crescimento e qualidade de mudas de pinhão-mansão produzidas em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 1, p. 37-46, 2011.

PAYERO, J.O.; IRMAK, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n.2, p. 191-202, 2008.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

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

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

PHALAN, B. The social and environmental impacts of biofuels in Asia: An overview. **Applied Energy**, London, v. 86, p. S21-S29, 2009.

RAJU, A.J.S.; EZRADANAM, V. Pollination ecology and fruiting behaviour in monoecious species, *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). **Current Science**, Bangalore, v. 83, n. 11, p. 1395-1398, 2002.

RENNER, A.; ZELT, T.; GERTEISER, S. **Global market study on Jatropha**. London: GEXSI LLP, 2008. 187 p.

RENNER, R. Green gold in a shrub: entrepreneurs target the Jatropha plant as the next big biofuel. **Scientific American**, New York, v. 296, n. 6, p. 20-23, 2007.

REUBENS, B.; ACHTEN, W.M.J.; MAES, W.H.; DANJON, F.; AERTS, R.; POESEN, J.; MUYS, B. More than biofuel? *Jatropha curcas* root system symmetry and potential for soil erosion control. **Journal of Arid Environments**, London, v. 75, p. 201-205, 2011.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 4 - Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 692-698. (Soil Science Society of America Book Series, 5)

SCHNEIDER, A.D.; HOWELL, T.A.; MOUSTAFA, A.T.A.; EVETT, S.R.; ABOU-ZEID, W. A simplified weighing lysimeter for monolithic or reconstructed soils. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 14, n. 3, p. 267-273, 1998.

SEVERINO, L.S.; VALE, L.S.; BELTRÃO, N.E.M. A simple method for measurement of *Jatropha curcas* leaf area. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 9-14, 2007.

SEVERINO, L.S.; LIMA, R.L.S.; LUCENA, A.M.A.; FREIRE, M.A.O.; SAMPAIO, L.R.; VERAS, R.P.; MEDEIROS, K.A.A.L.; SOFIATTI, V.; ARRIEL, N.H.C. Propagation by stem cuttings and root system structure of *Jatropha curcas*. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, p. 3160-3166, 2011.

SILVA, E.B.; TENURE, L.P.P.; SANTOS, S.R.; RESENDE JÚNIOR, P.S. Sintomas visuais de deficiências nutricionais em pinhão-mansão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 4, p. 392-397, 2009.

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.

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

VALDES-RODRIGUEZ, O.A.; SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, O.; PÉREZ-VÁZQUEZ, A.; RUIZ-BELLO, R. Soil texture effects on the development of *Jatropha* seedlings – Mexican variety ‘piñón manso’. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, p. 3529-3536, 2011.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M.T.; SIMUNEK, J.; LEIJ, F.J.; SEJNA, M. **RETC 6.02**: the RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Riverside, 2009. Disponível em: <<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?retc>>. Acesso em: 01 abr. 2011.

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.

WIESENHÜTTER, J. **Use of the physic nut (*Jatropha curcas* L.) to combat desertification and reduce poverty**: possibilities and limitation of technical solutions in a particular socio-economic environment, the case of Cape Verde. Bonn: GTZ, 2003. 18 p.

YE, M.; LI, C.; FRANCIS, G.; MAKKAR, H.P.S. Current situation and prospects of *Jatropha curcas* as a multipurpose tree in China. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 76, p. 487-497, 2009.

ANEXOS

ANEXO A – Participação das frações argila, silte e areia na composição textural do solo da área experimental

Fonte: Dados fornecidos pelos pesquisadores Fábio Jordão Rocha, Gilmar Batista Grigolon e João Alberto Lelis Neto.

Nota: Os rótulos se referem aos dados médios de quatro amostras e as barras representam o desvio padrão.

ANEXO B – Programa do CR1000 utilizado para a calibração e testes das células de carga e lisímetros

'CR1000 Series Datalogger

'Programa para calibracao dos lisímetros do pinhao-manso

'Autor: Danilton Luiz Flumignan

'Versao: 3

'Data: 03/10/2011

'Conexoes:

'HMP45C - Amarelo - 7H / Jump - 7L para 8L / Clear - Terra do DIFF7 / Azul - 8H / Roxo - 8L / Vermelho + Laranja - SW12V / Preto - G3 do Power out

'HBM1 - Vermelho - 1H / Branco - 1L / Azul - Terra do DIFF1 / Preto - VX1 / Amarelo - G1 do Power out

'HBM2 - Vermelho - 2H / Branco - 2L / Azul - Terra do DIFF2 / Preto - VX1 / Amarelo - G1 do Power out

'HBM3 - Vermelho - 3H / Branco - 3L / Azul - Terra do DIFF3 / Preto - VX1 / Amarelo - G1 do Power out

'ALFA1 - Verde - 4H / Branco - 4L / Preto - Terra do DIFF4 / Vermelho - VX2 / Clear - G2 do Power out

'ALFA2 - Verde - 5H / Branco - 5L / Preto - Terra do DIFF5 / Vermelho - VX2 / Clear - G2 do Power out

'ALFA3 - Verde - 6H / Branco - 6L / Preto - Terra do DIFF6 / Vermelho - VX2 / Clear - G2 do Power out

Public Bateria_V, TempCR1000_C, Temp_C, UR_pctg, HBM1_mV, HBM2_mV, HBM3_mV, ALFA1_mV, ALFA2_mV, ALFA3_mV, MHBM_mV, MALFA_mV

DataTable (Table1,True,-1)

DataInterval (0,1,Min,0)

CardOut (0,-1)

Minimum (1,Bateria_V,FP2,0,False)

Average (1,TempCR1000_C,FP2,False)

Average (1,Temp_C,FP2,0)

Average (1,UR_pctg,FP2,0)

Average (1,HBM1_mV,IEEE4,False)

Average (1,HBM2_mV,IEEE4,False)

Average (1,HBM3_mV,IEEE4,False)

Average (1,ALFA1_mV,IEEE4,False)

Average (1,ALFA2_mV,IEEE4,False)

Average (1,ALFA3_mV,IEEE4,False)

StdDev (1,HBM1_mV,IEEE4,False)

StdDev (1,HBM2_mV,IEEE4,False)

StdDev (1,HBM3_mV,IEEE4,False)

StdDev (1,ALFA1_mV,IEEE4,False)

StdDev (1,ALFA2_mV,IEEE4,False)

StdDev (1,ALFA3_mV,IEEE4,False)

```

Average (1,MHBM_mV,IEEE4,False)
Average (1,MALFA_mV,IEEE4,False)
StdDev (1,MHBM_mV,IEEE4,False)
StdDev (1,MALFA_mV,IEEE4,False)
EndTable

DataTable (Table2,True,-1)
  DataInterval (0,10,Min,0)
  CardOut (0,-1)
  Minimum (1,Bateria_V,FP2,0,False)
  Average (1,TempCR1000_C,FP2,False)
  Average (1,Temp_C,FP2,0)
  Average (1,UR_pctg,FP2,0)
  Average (1,HBM1_mV,IEEE4,False)
  Average (1,HBM2_mV,IEEE4,False)
  Average (1,HBM3_mV,IEEE4,False)
  Average (1,ALFA1_mV,IEEE4,False)
  Average (1,ALFA2_mV,IEEE4,False)
  Average (1,ALFA3_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,HBM1_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,HBM2_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,HBM3_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,ALFA1_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,ALFA2_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,ALFA3_mV,IEEE4,False)
  Average (1,MHBM_mV,IEEE4,False)
  Average (1,MALFA_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,MHBM_mV,IEEE4,False)
  StdDev (1,MALFA_mV,IEEE4,False)
EndTable

BeginProg
  Scan (2,Sec,1,0)
    Battery (Bateria_V)
    PanelTemp (TempCR1000_C,_60Hz)
    SW12(1)
    Delay (0,150,mSec)
    VoltDiff (Temp_C,1,mV2500,7,True,0,_60Hz,0.1,-40)
    VoltDiff (UR_pctg,1,mV2500,8,True,0,_60Hz,0.1,0)
    SW12(0)
    If UR_pctg>100 and UR_pctg<108 then UR_pctg=100
    BrFull (HBM1_mV,1,mV7_5,1,Vx1,1,2500,True,True,0,_60Hz,1.0,0)
    BrFull (HBM2_mV,1,mV7_5,2,Vx1,1,2500,True,True,0,_60Hz,1.0,0)
    BrFull (HBM3_mV,1,mV7_5,3,Vx1,1,2500,True,True,0,_60Hz,1.0,0)
    BrFull (ALFA1_mV,1,mV7_5,4,Vx2,1,2500,True,True,0,_60Hz,1.0,0)
    BrFull (ALFA2_mV,1,mV7_5,5,Vx2,1,2500,True,True,0,_60Hz,1.0,0)
    BrFull (ALFA3_mV,1,mV7_5,6,Vx2,1,2500,True,True,0,_60Hz,1.0,0)

```

196

```
MHBM_mV=(HBM1_mV+HBM2_mV+HBM3_mV)/3  
MALFA_mV=(ALFA1_mV+ALFA2_mV+ALFA3_mV)/3  
CallTable (Table1)  
CallTable (Table2)
```

```
NextScan
```

```
EndProg
```

ANEXO C – Cálculo do erro esperado pelo método de Kline e McClintock (1953) nos lisímetros de pesagem direta utilizando células de carga ALFA[®] e HBM[®]

ALFA

$$E_{total} = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2 + (E_3)^2}$$

$$E_{total} = \sqrt{\left(10000 \times \frac{0,03}{100}\right)^2 + \left(10000 \times \frac{0,03}{100}\right)^2 + \left(10000 \times \frac{0,03}{100}\right)^2}$$

$$E_{total} = \sqrt{3^2 + 3^2 + 3^2}$$

$$E_{total} = \sqrt{27}$$

$$E_{total} = 5,2 \text{ kg ou } 0,43 \text{ mm}$$

HBM

$$E_{total} = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2 + (E_3)^2}$$

$$E_{total} = \sqrt{\left(10000 \times \frac{0,02}{100}\right)^2 + \left(10000 \times \frac{0,02}{100}\right)^2 + \left(10000 \times \frac{0,02}{100}\right)^2}$$

$$E_{total} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 2^2}$$

$$E_{total} = \sqrt{12}$$

$$E_{total} = 3,46 \text{ kg ou } 0,29 \text{ mm}$$

Observações:

E_{total} é o erro total esperado do lisímetro;

E_1 é o erro esperado associado à primeira célula de carga;

E_2 é o erro esperado associado à segunda célula de carga;

E_3 é o erro esperado associado à terceira célula de carga.

ANEXO D – Ajuste da curva de retenção do solo da área experimental elaborada segundo o modelo de van Genuchten (1980)

Dados e resultados do ajuste da curva de retenção elaborada segundo o modelo de van Genuchten (1980), sendo Θ_s a umidade na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Θ_{CC} a umidade na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Θ_{PMP} a umidade no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Θ_r a umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), CAD a capacidade de água disponível ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e, por fim, α (cm^{-1}), n e m (adimensionais) são parâmetros de ajuste.

Tratamento	Camada (cm)	Θ_s	Θ_{CC}	Θ_{PMP}	Θ_r	CAD	α	n	m
Pivô central	0 – 20	0,48	0,35	0,31	0,31	0,04	0,1129	1,3729	0,2716
	20 – 40	0,52	0,44	0,4	0,37	0,04	0,1002	1,2425	0,1952
	40 – 60	0,52	0,46	0,39	0,06	0,07	0,1447	1,0433	0,0415
	60 – 130	0,53	0,41	0,35	..	0,06	0,3121	1,0522	0,0496
Gotejamento	0 – 20	0,49	0,37	0,32	0,31	0,05	0,0627	1,3999	0,2857
	20 – 40	0,52	0,4	0,35	0,34	0,05	0,1686	1,2929	0,2265
	40 – 60	0,52	0,46	0,39	0,04	0,07	0,1633	1,0407	0,0391
	60 – 130	0,55	0,39	0,32	0,3	0,07	0,0993	1,3048	0,2336
Sem irrigação	0 – 20	0,46	0,37	0,32	0,26	0,05	0,1333	1,1444	0,1262
	20 – 40	0,52	0,42	0,38	..	0,04	0,7232	1,0375	0,0361
	40 – 60	0,53	0,43	0,37	..	0,06	0,3487	1,0434	0,0415
	60 – 130	0,55	0,39	0,33	0,29	0,06	0,1103	1,2656	0,2099

Nota: .. Não se aplica dado numérico, pois o ajuste do modelo encontrou valor menor que 0,001.

Valores de Θ_{CC} e Θ_{PMP} foram assumidos como aqueles correspondentes à umidade volumétrica encontrada nas tensões de 300 e 15.000 cm.c.a., respectivamente, conforme recomendação de Kirkham (2005) para solos de textura argilosa.

Gotejamento

Sem irrigação

ANEXO E – Ficha de controle para a rotina de adição e retirada das massas padrão na calibração dos lisímetros

LISÍMETROS PINHÃO-MANSO

Autor: Danilton Luiz Flumignan Data: 24/05/2011 versão: 1

Nº da massa	Massa adicionada (kg)	Acumulado (kg)	Hora (adição / retirada)
Sem nada	0	0	/
1	50	50	/
2	50	100	/
3	50	150	/
4	10	160	/
5	2	162	/
6	2	164	/
7	10	174	/
8	50	224	/
9	50	274	/
10	50	324	/
11	10	334	/
12	2	336	/
13	2	338	/
14	10	348	/
15	50	398	/
16	50	448	/
17	10	458	/
18	10	468	/
19	10	478	/
20	10	488	/
21	10	498	/
22	2	500	/
23	2	502	/
24	10	512	/
25	10	522	/
26	10	532	/
27	10	542	/
28	10	552	/
29	50	602	/
30	50	652	/
31	10	662	/
32	2	664	/
33	2	666	/
34	10	676	/
35	50	726	/
36	50	776	/
37	50	826	/
38	10	836	/
39	2	838	/
40	2	840	/
41	10	850	/
42	50	900	/
43	50	950	/
44 = Carga total	50	1000	