# Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

# Estimativa da transpiração de pinhão manso com a utilização do método de dissipação térmica

# João Paulo Francisco

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba 2017 João Paulo Francisco Engenheiro Agrônomo

# Estimativa da transpiração de pinhão-manso com a utilização do método de dissipação térmica

Orientador: Prof. Dr. MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba 2017

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Francisco, João Paulo

Estimativa da transpiração de pinhão-manso com a utilização do método de dissipação térmica / João Paulo Francisco. - - Piracicaba, 2017. 111 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Lisímetros 2. Manejo da irrigação 3. Balanço hídrico 4. Evapotranspiração 5. Fluxo de seiva I. Título

À minha mãe, Lúcia Helena, pelo exemplo de amor e de fé e por sempre me mostrar os caminhos a serem seguidos e me ensinar a nunca desistir dos meus ideais.

> À minha madrinha, Cleusa Mello, pelo total apoio e confiança e à minha irmã, Pabiely (Bi).

> > DEDICO

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela fé e perseverança e me fazer acreditar que essa conquista sempre foi possível.

À Universidade de São Paulo, em referência à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" e ao Programa de Pós-graduação da ESALQ/USP, por toda estrutura oferecida para que esse trabalho fosse possível.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

À equipe da Biblioteca da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" pela apoio e adequação da tese nas normas da ESALQ/USP.

Ao professor Marcos Vinícius Folegatti, meu orientador, que acreditou no meu potencial e me proporcionou a chance de vencer mais uma etapa em minha vida. Certamente, sem a sua participação e apoio, este trabalho não seria possível. Pela franqueza, lealdade, amizade, orientação e acima de tudo pela confiança depositada em mim.

Ao professor Dr. Leonardo Duarte Batista da Silva pela confiança depositada, orientação na graduação e, sobretudo, amizade. Pelos valiosos conselhos e ensinamentos que proporcionaram meus primeiros passos na pesquisa.

Às secretárias, Davilmar Aparecida Colevatti, Ângela Márcia Derigi Silva e Paula Leme pelo apoio e ajuda nas horas burocráticas e à Beatriz Regina Duarte Novaes, que com sua extrema competência é capaz de resolver os mais difíceis problemas sem deixar a simpatia e o sorriso de lado. E a toda equipe da biblioteca central da ESALQ, pela revisão do trabalho.

Aos funcionários e amigos do Departamento de Engenharia de Biossistemas que durante toda minha caminhada estavam presentes, em especial: Gilmar Batista Grigolon, Paula Alessandra Bonassa Pedro, Sr. Antônio Agostinho Gozzo (Tatão), Hélio Toledo Gomes, Luís Custódio de Camargo, Luiz Afonso da Costa, Antônio Pires de Camargo, Áureo Santana, Francisco (Chicão), Agnaldo Desgapari, José Geraldo e Lino Stênico.

Um agradecimento especial à Luis Afonso (*In Memorian*), Luis Custódio e Aureo Santana que sempre se prontificaram em cooperar com todas as atividades relacionadas à Fazenda Areão (FAR).

Aos amigos e colegas de pós-graduação pelos bons momentos vividos e troca de aprendizado.

Aos amigos de republica pelo bom convívio durante essa longa caminhada.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para realização deste trabalho.

Muito Obrigado a todos

# EPÍGRAFE

"Tornamos nosso mundo significativo pela coragem de nossas perguntas e pela profundidade de nossas respostas. Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para encontrar as que estão certas."

(Carl Sagan)

| RES  | SUMO   | 8  |
|------|--|----|
| ABS  | STRACT   | 9  |
| LIST | TAS DE FIGURAS   | 10 |
| 1191 | TAS DE TARELAS   | 16 |
|      |  | 10 |
| 1    | INTRODUÇAO   | 17 |
| 2    | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  | 19 |
|      | 21 Ω pinhão manso  | 19 |
|      | 2.2 Evapotranspiração  | 20 |
|      | 2.2.1 Evaporação   | 21 |
|      | 2.2.2 Transpiração   | 22 |
|      | 2.3 Medidas de fluxo de seiva pelo método de dissipação térmica              | 22 |
| 3    | MATERIAL E MÉTODOS   | 25 |
|      | 3.1 DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO   | 25 |
|      | 3.2 ETAPA I – CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DA SONDA DE DISSIPAÇÃO TÉRMICA            | 25 |
|      | 3.2.1 Caracterização da área experimental                                    | 25 |
|      | 3.2.2 Caracterização do material solo utilizado para preenchimento dos vasos | 29 |
|      | 3.2.3 Construção e calibração dos lisímetros                                 | 30 |
|      | 3.2.4 Manejo da irrigação  | 33 |
|      | 3.2.4.1 Calibração dos transdutores de pressão                               | 34 |
|      | 3.2.5 Determinação da transpiração das plantas                               | 36 |
|      | 3.2.6 Construção e instalação das sondas de dissipação térmica (SDT)         | 38 |
|      | 3.2.7 Calibração das sondas de dissipação térmica e avaliação das plantas    | 41 |
|      | 3.3 ETAPA II – DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO DE PINHÃO-MANSO                  | 42 |
|      | 3.3.1 Considerações sobre o histórico da área experimental                   | 42 |
|      | 3.3.2 Caracterização da area experimental                                    | 45 |
|      | 3.3.3 I ratamentos, delineamento estatistico e controle da umidade do solo   | 40 |
|      | 3.3.4 Caracterização do solo e da agua de imgação                            | 47 |
|      | 3.3.5.1 Sistemas de irrigação  | 40 |
|      | 3.3.5.2 Manejo da irrigação e monitoramento da umidade no solo               | 51 |
|      | 3.3.6 Poda   | 54 |
|      | 3.3.7 Evapotranspiração, coeficiente de cultivo e transpiração               | 56 |
|      | 3.3.8 Instalação dos sensores de fluxo de seiva                              | 57 |
|      | 3.3.9 Avaliações das plantas de pinhão manso                                 | 58 |
| ٨    |  | 61 |
| 7    |  | 61 |
|      | 4.1 RESOLTADOS REFERENTES A ETAFA I  | 61 |
|      | 4.1.1 Condições meteorologicas no micror da casa de vegetação                | 62 |
|      | 4.1.2 Conteúdo de água no solo   | 65 |
|      | 4.1.4 Avaliação das características biométricas das plantas                  | 66 |
|      | 4.1.5 Condutância estomática   | 71 |
|      | 4.1.6 Calibração do fluxo de seiva   | 76 |
|      | 4.2 RESULTADOS REFERENTES À ETAPA II   | 78 |
|      | 4.2.1 Condições meteorológicas   | 78 |
|      | 4.2.2 Características biométricas das plantas                                | 84 |
|      | 4.2.3 Condutância estomática   | 86 |
|      | 4.2.4 Armazenamento da água no solo  | 92 |
|      | 4.2.5 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo                             | 94 |
|      | 4.2.6 Transpiração das plantas de pinhão-manso                               | 97 |
| 5    | CONCLUSÕES 1   | 05 |
| REF  | FERÊNCIAS 1  | 07 |

# SUMÁRIO

#### RESUMO

# Estimativa da transpiração de pinhão-manso com a utilização do método de dissipação térmica

Atualmente o mundo vive uma fase de mudança da matriz energética, onde fontes mais limpas e renováveis de energia estão sendo cada vez mais utilizadas. Considerando o eminente cenário de escassez dos recursos hídricos, além da necessidade de produzir energia mais limpa, existe a necessidade de racionalizar o uso da água e para isso é preciso estudar o consumo hídrico das culturas. Assim, este projeto terá como objetivos calibrar e utilizar medidas de fluxo de seiva obtidas pelo método de dissipação térmica (MDT) para determinar a transpiração do pinhãomanso (Jatropha curcas L.). Para a calibração foram utilizadas plantas de pinhãomanso cultivadas em casa de vegetação dentro de vasos de 250 L. Estes vasos foram acondicionados sobre lisímetros de pesagem e tiveram sua superfície coberta para evitar a evaporação da água do solo. A calibração foi realizada durante 60 dias consecutivos, guando durante os primeiros 15 dias o solo foi mantido com umidade próxima da condição de capacidade de vaso por meio de irrigações frequentes, seguido de 30 dias de redução da umidade do solo devido a supressão da irrigação e de 15 dias finais com o retorno da irrigação para a recuperação da hidratação das plantas. A transpiração foi determinada nos lisímetros e estes dados foram utilizados para calibrar as medidas obtidas por sensores de fluxo de seiva inseridos no tronco das plantas. Após a calibração, os sensores foram instalados em campo para monitorar a transpiração de plantas cultivadas sob irrigação por pivô central, gotejamento e sem irrigação. Aliado a diferentes tipos de poda a que foram submetidas as plantas, avaliou-se a combinação do consumo de água das plantas de pinhão-manso associado a estes tratamentos de podas. Como esperado o método de dissipação térmica apresentou-se como sendo confiável para determinação da transpiração de pinhão-manso, permitindo que a metodologia pudesse ser utilizada em campo. Foi verificado efeito significativo da irrigação, dos tipos de poda e da época de avaliação após a poda para a altura de plantas, diâmetro e volume de copa e IAF. Observou-se valores de ETc de 6,96; 7,54 e 6,57 mm dia<sup>-1</sup> para os tratamentos de irrigação localizada, pivô central e sem irrigação, respectivamente.

Palavras-chave: Lisímetros; Manejo da irrigação; Balanço hídrico; Evapotranspiração; Fluxo de seiva

### ABSTRACT

## Estimation of Jatropha perspiration using the thermal dissipation method

Today the world is going through a phase of changing the energy matrix, where cleaner and renewable sources of energy are being used more and more. Considering the imminent scenario of scarcity of water resources, in addition to the need to produce cleaner energy, there is a need to rationalize the use of water and for this we must study the water consumption of crops. Thus, this project will aim to calibrate and use sap flow measurements obtained by the thermal dissipation probe to determine Jatropha curcas L. transpiration. For the calibration, jatropha plants grown under greenhouse conditions were used in 250 L vessels. These vessels were placed on weighing lysimeters and had their surface covered to avoid evaporation of soil water. The calibration was carried out during 60 consecutive days, which during the first 15 days the soil was maintained with humidity near the pot capacity by means of frequent irrigations, followed by 30 days of soil moisture reduction due to suppression of irrigation and of 15 days with the return of irrigation to the recovery of plant hydration. The transpiration was determined in the lysimeters and these data were used to calibrate the measurements obtained by sap flow sensors inserted in the trunk of the plants. After the calibration, the sensors were installed in the field to monitor the transpiration of plants cultivated under central pivot irrigation, drip irrigation and without irrigation. Allied to the different types of pruning to which the plants were submitted, the combination of the water consumption of the jatropha plants associated to these pruning treatments was evaluated. As expected, the thermal dissipation method proved to be reliable for the determination of perspiration of Jatropha, allowing the methodology to be used in the field. It was verified a significant effect of irrigation, pruning types and evaluation period after pruning for plant height, canopy diameter and volume and LAI. ETc values of 6.96; 7.54 and 6.57 mm day-1 for the treatments of localized irrigation, central pivot and without irrigation, respectively.

Keywords: Lysimeters; Irrigation management; Hydric balance; Evapotranspiration; Flow of sap

### LISTAS DE FIGURAS

Figura 4. Vista lateral e célula de carga com ponto de apoio associado. ...... 31

Figura 9. Sonda de dissipação térmica construída (A); SDT ao lado da capsula de alumínio (B); abertura dos furos para inserção da cápsula de alumínio (C); inserção da cápsula de alumínio no interior do tronco (D); inserção da SDT, já com a pasta térmica, no interior da cápsula de alumínio (E); papel alumínio protegendo a SDT minimizar o efeito da incidência da radiação eletromagnética sobre as medidas (F).

| Figura 1 | 0. Diagrama | elétrico da | fonte de | corrente. |  |  | 40 |
|----------|-------------|-------------|----------|-----------|--|--|----|
|----------|-------------|-------------|----------|-----------|--|--|----|

Figura 11. Detalhe da placa elétrica com detalhes para os componentes eletrônicos.

Figura 12. Croqui da área experimental ......43

Figura 13. Vista superior das células de carga da marca Alfa Instrumentos (A) e da marca HBM (B); Planta de pinhão-manso cultivada no lisímetro instalado na área de irrigação localizada no primeiro e quarto ano de cultivo (C e D, respectivamente)...45

Figura 18. Tubos de acesso instalados nos lisímetros......53

Figura 39. Total de precipitação ao longo do período de avaliação da Etapa II......84

Figura 42. Condutância estomática (mmol m-2 s-1) e radiação solar global (W m-2) avaliadas em folhas da base, do terço médio superior e de folhas novas, no tratamento sem irrigação para o dia juliano 100 de 2016, considerando a poda 1 (A), poda 2 (B) e poda 3 (C)......91

# LISTAS DE TABELAS

| Tabela 1. Caracterização química da agua utilizada no experimento  |
|--|
| Tabela 2. Caracterização físico-hídrica do solo utilizado no experimento 29  |
| Tabela 3. Caracterização química do solo utilizado no experimento  |
| Tabela 4. Valores de umidade de saturação (θs) e residual (θr) e dos parâmetros empíricos (α, n e m) do modelo de van Genuchten (1980)   |
| Tabela 5. Atributos químicos e físicos do solo da área de implantação doexperimento47  |
| Tabela 6. Resultados da análise físico-química da água utilizada para irrigação 48   |
| Tabela 7. Dados e resultados do ajuste da curva de retenção elaborada segundo o modelo de van Genuchten (1980), sendo $\Theta$ s a umidade na saturação (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ), $\Theta$ CC a umidade na capacidade de campo (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ), $\Theta$ PMP a umidade no ponto de murcha permanente (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ), $\Theta$ r a umidade residual (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ), CAD a capacidade de água disponível (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) e, por fim, $\alpha$ (cm <sup>-1</sup> ), n e m (adimensionais) são parâmetros de ajuste |
| Tabela 8. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão da alturaao longo dos 60 dias de condução da Etapa I69   |
| Tabela 9. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão do diâmetro da copa ao longo dos 60 dias de condução da Etapa I  |
| Tabela 10. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão do volume da copa ao longo dos 60 dias de condução da Etapa I   |

Tabela 11. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão do IAFao longo dos 60 dias de condução da Etapa I70

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente o mundo vive numa fase de mudança da matriz energética, onde fontes mais limpas e renováveis de energia estão sendo cada vez mais utilizadas com vistas à redução dos impactos ambientais e devido à futura exaustão 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 com a vasta extensão territorial e a grande diversidade de clima, solos e espécies oleaginosas, o Brasil encontra-se em uma situação bastante promissora. Dentre as diferentes espécies oleaginosas, o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) vem se destacando como alternativa no fornecimento de matéria prima para a produção de biodiesel no Brasil, principalmente no semiárido nordestino e no cerrado.

O óleo produzido pode ser facilmente convertido em biodiesel líquido, a torta resultante da prensa pode ser utilizada como fertilizante e o resíduo orgânico pode ser submetido à digestão para produção de biogás. Outras características importantes que tem impulsionado a popularização do pinhão-manso são atribuídas ao fato de ser uma planta não comestível, exigente em insolação e bastante tolerante à seca e a baixa fertilidade do solo. Além disso, inúmeras referências tem sido feitas com relação ao bom desempenho que tem o pinhão-manso na recuperação de áreas degradadas.

No entanto, o comportamento desta planta quanto ao seu consumo hídrico ainda é pouco conhecido e precisa ser devidamente estudado a fim de se aprofundar os conhecimentos sobre a cultura e fornecer informações confiáveis que possam ser utilizadas pelos diversos usuários que carecem destas.

A quantificação do consumo hídrico das culturas é de suma importância para diversas aplicações na agricultura, tais como em estudos de zoneamento agrícola, no manejo da irrigação e em estudos fisiológicos e hidrológicos em geral. Considerando o eminente cenário de escassez dos recursos hídricos no mundo, conhecer o consumo hídrico do pinhão-manso se torna mais importante, pois o aumento na produção de biodiesel certamente irá aumentar a pressão pelo uso da água no mundo todo. Desta forma, além da necessidade de produzir energia mais limpa, existe a necessidade de racionalizar a utilização dos recursos hídricos. O objetivo geral da pesquisa foi determinar a transpiração do pinhãomanso em campo cultivado sob irrigação por pivô central, gotejamento e sem irrigação e submetido a diferentes tipos de poda. Destacando-se com objetivos específicos:

• calibrar e validar o método da sonda de dissipação térmica para a determinação da transpiração do pinhão-manso;

• avaliar o consumo de água das plantas de pinhão-manso submetidas a diferentes tipos de poda.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 O pinhão manso

Pertencente à família das Euforbiáceas, é denominado cientificamente Jatropha curcas L. e popularmente como pinhão-manso, purgueira ou pinha de purga. Possui uma maior diversidade na América Central e do Sul e possivelmente é originária da América (Saturnino *et al.*, 2005). Encontra-se desde a orla marítima até os 1.000 m de altitude, sendo seu cultivo mais indicado em regiões que apresentam entre 500 e 800 m. 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 (Brittaine e Lutaladio, 2010).

É um arbusto de crescimento rápido com altura variando entre dois a três metros, possui raízes curtas e pouco ramificadas, caule liso, de lenho mole e medula desenvolvida, mas pouco resistente e floema com longos canais que se estendem até as raízes. Tronco dividido desde a base, em compridos ramos, com numerosas cicatrizes produzidas pela queda das folhas (Achten *et al.*, 2008). O seu padrão de crescimento é do tipo simpodial, 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 (Brittaine e Lutaladio, 2010).

A planta possui rápido crescimento inicial precisando de apenas 10 dias para que a germinação das sementes ocorra, desde que em adequadas condições de umidade (Heller, 1996). Após a germinação das sementes, são necessárias aproximadamente sete semanas para que a muda apresente porte suficiente para transplantio (Paulino *et al.*, 2011). No campo, o crescimento vegetativo ocorre durante a estação chuvosa, tendo seu crescimento reduzido durante a estação seca, momento isso caracterizado pela senescência foliar que é um mecanismo de defesa da planta que visa reduzir seu processo transpiratório em resposta ao déficit hídrico (Kumar e Sharma, 2008).

O fruto é capsular trilocular e ovóide com diâmetro de 1,5 a 3,0 cm. Apresenta uma semente em cada cavidade, formado por um pericarpo ou casca dura e lenhosa, indeiscente, inicialmente verde, passando a amarelo e depois preto. Na maturação contém de 53 a 62% de sementes e de 38 a 47% de casca, pesando cada uma de 1,53 a 2,85 g (Ye *et al.*, 2009). Para (Ye *et al.*, 2009), o pinhão-manso começa a frutificar aos três ou quatro anos de idade nas regiões de clima seco.

A produtividade do pinhão manso pode variar muito em função da região de plantio, método de cultivo, tratos culturais e idade da cultura. (Arruda *et al.*, 2004) citando diferentes autores, apresenta uma produção variando 500 a 2000 kg ha<sup>-1</sup>, porém as plantas com maiores produções chegaram a produzir 6.373 kg ha<sup>-1</sup>. Este mesmo autor coloca esta produção como sendo um indicativo de uma produção potencial que se pode obter desta cultura, desde que sejam adotadas práticas de manejo adequadas como adubação equilibrada e irrigação para suprir a necessidade hídrica.

Segundo (Carnielli, 2003) é uma planta oleaginosa viável para obtenção de biodiesel, produz no mínimo 2 toneladas de óleo por hectare, podendo chegar, segundo (Heiffig e Camara, 2006) a 3,5 toneladas, mesmo sem irrigação. Para condições de cultivo melhores, incluindo boas práticas de manejo, boa fertilidade do solo e boa disponibilidade hídrica (entre 900 e 1200 mm ano<sup>-1</sup>), acredita-se que a produtividade possa atingir seguramente 5 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tewari, 2007). Em muitos países da América do Sul e Central, África e Ásia há programas oficiais ou iniciativas particulares incentivando o plantio de pinhão manso, mas em nenhum deles esta cultura é tradicional, nem existem lavouras bem estabelecidas onde se possa confirmar sua produtividade e rentabilidade (Severino *et al.*, 2007).

#### 2.2 Evapotranspiração

O consumo de água de uma cultura corresponde ao conjunto de perdas de água do sistema solo-planta para a atmosfera, uma vez que é insignificante a quantidade de água armazenada nos tecidos da planta, podendo, portanto, ser expresso na forma de evapotranspiração (ET) (Allen *et al.*, 1998). O processo de ET incorpora dois componentes distintos, a evaporação (E) da superfície do solo, e a transpiração (T) do dossel da planta. Apesar de ocorrerem separadamente, em geral são analisados conjuntamente por meio de ET devido à dificuldade de distingui-los.

Além de ET de um cultivo, determina-se também a evapotranspiração de referência (ETo), também denominada demanda da atmosfera. Ela refere-se à quantidade de ET de uma superfície de referência, representada por um cultivo hipotético de vegetação rasteira, com altura constante de 12 cm, resistência

superficial de 70 s m-1 e albedo de 0,23. Portanto, a superfície de referência é similar a uma área extensa de grama verde, conduzida sem limitações hídricas, mantida com altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente o solo (Allen *et al.*, 1998).

Dentre todos os métodos de medida de ET, o uso de lisímetros de pesagem se destaca como o mais prático, preciso e sensível (Allen *et al.*, 1998). Lisímetros de pesagem consistem em tanques preenchidos com solo assemelhando-se ao encontrado nas condições naturais, no qual é cultivada a cultura de interesse e ET é obtida a partir da variação de massa do lisímetro.

Embora considerem que as medidas obtidas por métodos precisos sejam importantes nas pesquisas científicas, (Pereira *et al.*, 1997) e (Allen *et al.*, 1998) apontam que a obtenção de dados a partir de lisímetros é bastante difícil e onerosa, justificando seu uso apenas em condições experimentais, após a calibração do sistema nas condições do estudo para que se obtenham dados confiáveis.

(Campeche, 2002; Flumignan, 2012) (Lena, 2013) mencionam diferentes autores que colocam o uso de lisímetros de pesagem como ferramenta padrão em estudos de consumo de água das culturas, seja na determinação da evapotranspiração, como também na calibração de modelos agrometeorológicos de estimativa. Diversas pesquisas ao redor do mundo comparam os valores obtidos pelos modelos de estimativa da evapotranspiração da cultura, com dados lisimétricos.

# 2.2.1 Evaporação

A evaporação é um processo físico no qual uma substância no estado líquido passa para o estado de vapor e é removida da superfície evaporante. Este processo pode ocorrer numa massa contínua, como nos oceanos, lagos e rios, ou numa superfície úmida, como no solo e na superfície vegetal (Pereira *et al.*, 1997). Como resultado da evaporação o ar se torna cada vez mais úmido, acarretando numa diminuição do processo, ou seja, redução da taxa de evaporação. Essa renovação do ar que circunda a superfície evaporante é realizada pelo vento (Carvalho e Oliveira, 2012).

Para que o processo de evaporação ocorra é necessário suprimento de energia externa, portanto, é um processo que utiliza energia externa ao sistema e o

transforma em calor latente. A radiação solar direta e, em menor grau, a temperatura do ar, proporcionam esta energia. No caso específico da evaporação, a quantidade de energia necessária para promover a mudança de fase é denominada calor latente de evaporação. Colocando este conceito em números, é a quantidade de energia (calor) necessária para evaporar 1 g de água a uma temperatura (T), portanto, se esta temperatura for de 20°C a energia empregada no sistema para evaporar esse 1 g de água será de 2,45 MJ (Pereira *et al.*, 1997)

# 2.2.2 Transpiração

A transpiração é o processo pelo qual a água é absorvida pelo sistema radicular das plantas, atravessando-as pelos vasos condutores (xilema) e chega até as folhas onde ocorre sua saída para a atmosfera através dos estômatos. De forma resumida, é a difusão da água através dos estômatos para a atmosfera (Taiz e Zeiger, 2013). A transpiração nas plantas é importantíssima, pois sendo seres vivos sem movimento, esse processo é usado como arrefecimento de todos os tecidos vegetais.

A manutenção e continuidade do processo de transpiração é alcançado por meio da reposição de água no solo. Devido as forças de adesão e coesão da água, propriedades físicas das moléculas, forma-se um contínuo solo-planta-atmosfera, que estabelece um gradiente de potencial da água, desde o solo até a atmosfera. Partindo-se do princípio de que a água se move sempre do maior potencial para o menor potencial, a atmosfera, com seu potencial total da água altamente negativo, atua como um dreno (Pereira *et al.*, 1997). Desta forma, quanto mais seco estiver o ar, maior será o gradiente de potencial entre a atmosfera e a folha e, consequentemente, maior será a força desse dreno.

De acordo com (Pereira *et al.*, 1997) os elementos meteorológicos que participam do processo são a umidade do ar, a radiação solar e a temperatura do ar, estas por sua vez fornecendo energia ao sistema, além de a velocidade do vento também influenciar atuando como agente removedor do vapor.

# 2.3 Medidas de fluxo de seiva pelo método de dissipação térmica

O método de dissipação térmica, ou simplesmente Granier, envolve a inserção perpendicular de duas sondas na mesma linha axial do ramo ou tronco,

sendo que uma delas, a superior, é aquecida de forma constante com fornecimento de potência elétrica de aproximadamente 0,2 watt. A variação da temperatura em cada instante entre as duas sondas (a aquecida e a não aquecida) é ocasionada pelo transporte convectivo de calor por meio da seiva. A máxima diferença de temperatura entre as duas sondas significa que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo, enquanto que a mínima diferença significa uma taxa máxima de fluxo de seiva através da área de transporte (xilema)

O método de Granier é amplamente utilizada para determinação da transpiração das mais diversas culturas. Em cultivo de manga (Lu e Chacko, 1998) encontraram boa concordância entre os valores de transpiração medidas por gravimétrica e o fluxo de seiva em escala diária pelo método de dissipação térmica. (Silva *et al.*, 2004) obtiverem excelentes resultados de transpiração do kiwi utilizando o método de Granier.

O método de Granier fundamenta-se em uma calibração para se ter o valor do fluxo de seiva, ao contrário dos outros métodos térmicos que se baseiam em um tratamento teórico, embora no método de pulso de calor possa haver uma calibração adicional ao tratamento teórico. Inicialmente o método foi desenvolvido para espécies florestais. (Cabidel e Do, 1991) determinaram relações para outras três espécies e chegaram a valores muito próximos dos obtidos por (Granier, 1985). O próprio (Granier e Gross, 1987) encontrou relações próximas à do seu primeiro trabalho apra outras espécies florestais, o que levou à proposta de que, pela proximidade dos valores entre os diferentes trabalhos, a equação de Granier poderia ser adotada como universal, pelo menos para plantas lenhosas.

# 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Desenvolvimento do experimento

A pesquisa foi conduzida em duas etapas, sendo a primeira, denominada Etapa I, desenvolvida no Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em casa de vegetação, e a segunda, denominada Etapa II, foi desenvolvida na área experimental da Fazenda Areão (FAR) pertencente à ESALQ/USP. O clima da região, de acordo com a classificação Köppen, é do tipo Cwa, que se caracteriza por ser subtropical úmido, com chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e a do mês mais frio, inferior a 18°C. A temperatura média anual é de 21,4°C e o total de chuva de 1.257 mm.

A Etapa I foi caraterizada pela construção das sondas e calibração do método de dissipação térmica para determinação da transpiração de plantas de pinhão-manso. Esta etapa foi fundamental, pois somente com a calibração da equação de Granier e avaliação de seu comportamento nas plantas de pinhão-manso viabilizava a execução da Etapa II. Esta, por sua vez permitiu a determinação da transpiração das plantas de pinhão-manso a nível de campo, com a plantas cultivadas sem irrigação e sob sistema de irrigação localizada e por pivô central.

# 3.2 Etapa I – Calibração do método da sonda de dissipação térmica

#### 3.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento da Etapa I foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em ambiente protegido (casa de vegetação), localizada no município de Piracicaba - SP (latitude 22º43'31"; longitude 47º38'57"; altitude 547 m).

A casa de vegetação apresenta estrutura metálica galvanizada, medindo 4,6 m de altura na parte central e 3,0 m de pé direito; 12,8 m de largura; 22,5 m de comprimento (Figura 1A). As paredes laterais e frontais foram confeccionadas com telas antiafídeos e rodapé de 0,30 m em concreto armado. As estufas são providas de cortinas de plástico transparente com espessura de 0,10 mm, e dispositivo de levantamento durante o dia para manejo da temperatura e umidade relativa do ar em seu interior e proteção contra chuvas e ventos excessivos. A estrutura experimental é provida de energia elétrica e de água, armazenada em três caixas com capacidade para 500 litros, provinda da rede de tratamento de água da ESALQ/USP. Na Tabela 1 apresentam-se a caracterização química da água utilizada durante a condução do experimento.

| Parâmetros de qualidade | Valores obtidos (mg L <sup>-1</sup> ) |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------------|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| Cloreto                 | 26,1                                  |  |  |  |  |  |  |  |
| Nitrato                 | 5,1                                   |  |  |  |  |  |  |  |
| Sulfato                 | 43,9                                  |  |  |  |  |  |  |  |
| Fósforo                 | 0,003                                 |  |  |  |  |  |  |  |
| Nitrogênio amoniacal    | 0,1                                   |  |  |  |  |  |  |  |
| Sódio                   | 30,5                                  |  |  |  |  |  |  |  |
| Potássio                | 3,0                                   |  |  |  |  |  |  |  |
| Cálcio                  | 24,6                                  |  |  |  |  |  |  |  |
| Magnésio                | 2,0                                   |  |  |  |  |  |  |  |
| Ferro                   | 0,025                                 |  |  |  |  |  |  |  |
| Cobre                   | 0,007                                 |  |  |  |  |  |  |  |
| Manganês                | 0,012                                 |  |  |  |  |  |  |  |
| Zinco                   | 0,033                                 |  |  |  |  |  |  |  |
| pH (adimensional)       | 6,9                                   |  |  |  |  |  |  |  |
|                         |                                       |  |  |  |  |  |  |  |

 Tabela 1. Caracterização química da água utilizada no experimento

O monitoramento meteorológico da área experimental foi realizado por meio da instalação, no centro do experimento, de sensores de radiação global modelo CM3 Kipp & Zonen<sup>®</sup>; temperatura e umidade relativa do ar – termohigrômetro modelo HMP45C da Vaisala<sup>®</sup>, com os dados coletados a cada segundo e média a cada quinze minutos (Figura 1B). Para coleta e armazenamento dos dados, utilizou-se um sistema automático de aquisição de dados. Os sensores foram instalados a 2 m de altura.



Figura 1. Vista frontal da casa de vegetação utilizada no experimento (A). Sensores instalados para aquisição dos dados meteorológicos (B).

As plantas de pinhão-manso utilizadas para realização da Etapa I foram semeadas no mês de outubro de 2012, dentro de 12 caixas d'água (vasos), sendo uma por vaso. Os vasos utilizados apresentavam forma circular, confeccionados de polietileno. No fundo foi adaptado um registro para a drenagem da água e, o mesmo, apresentava capacidade para 250 L, com as seguintes dimensões (54 cm de altura por 98 cm de diâmetro superior e 74 cm de diâmetro inferior). Estes foram preenchidos com camada de pedra brita (em torno de 8 cm), seguida de manta geotêxtil e, por fim, o volume restante foi completado com solo.

Na Figura 2 está apresentada a disposição dos vasos na área experimental. Como pode ser facilmente verificado na Figura 2, os quatro vasos centrais foram utilizados como lisímetros afim de monitorar as entradas e saídas de água do sistema. A calibração da equação de estimativa do fluxo de seiva foi efetuada por medidas de transpiração das plantas cultivadas nos lisímetros.



**Figura 2.** Croqui da área experimental dentro da casa de vegetação (A), vasos utilizados para cultivo do pinhão-manso com detalhe do tubo de acesso para monitoramento da umidade do solo e registro de drenagem abaixo (B) e disposição dos vasos dentro da casa de vegetação (C).

Nos 12 vasos foram instalados tubo de acesso para sonda de capacitância Diviner, com objetivo de monitorar a umidade ao longo do perfil de solo no interior dos vasos. Também foram instalados uma bateria de três tensiômetros associados a transdutores de pressão em cada um dos lisímetros. O tubo de acesso e os tensiômetros são apresentados na Figura 3.



**Figura 3.** Tubo de acesso da sonda de capacitância instalado à profundidade de 40 cm (A); tensiômetros de 10, 20 e 30 cm (B); vista dos conectores dos transdutores de pressão (C); tubo de acesso e transdutores de pressão instalados (D).

# 3.2.2 Caracterização do material solo utilizado para preenchimento dos vasos

O solo utilizado na Etapa I do experimento foi classificado como Latossolo Vermelho-amarelo distrófico (Embrapa, 2013), obtido na profundidade de 0,30 m da camada agricultável, proveniente do campus da ESALQ/USP. As propriedades físicas do solo foram determinadas realizando-se análise granulométrica, conforme metodologia proposta por (Bouyoucos, 1951): densidade das partículas, utilizando o método do picnômetro e densidade do solo, determinada pelo método da proveta, os quais são recomendados pela (Embrapa, 1997) (Tabela 2).

| Comodo         | CC PMP               |       |           | CAD Ds             | Dp   | рт         | Frações granulométricas |       |        |  |
|----------------|----------------------|-------|-----------|--------------------|------|------------|-------------------------|-------|--------|--|
| Camada<br>(cm) |                      | FIVIE | (mm)      |                    |      | PI<br>(9/) | Areia                   | Silte | Argila |  |
| (CIII)         | cm3 cm <sup>-3</sup> |       | - (11111) | g cm <sup>-3</sup> |      | ( /0)      | %                       |       |        |  |
| 0-20           | 0,226                | 0,104 | 24,4      | 1,48               | 2,65 | 44,7       | 75,1                    | 7,8   | 17,1   |  |
| 20-40          | 0,234                | 0,109 | 25,0      | 1,49               | 2,65 | 46,9       | 74,5                    | 8,6   | 17,0   |  |

Tabela 2. Caracterização físico-hídrica do solo utilizado no experimento

A caraterização química do solo está apresentada na Tabela 3. Os íons trocáveis foram analisados de acordo com os métodos citados pela (Embrapa, 1997) e (Raij, 2001). Para determinação da concentração dos íons solúveis foram confeccionadas pastas na umidade de saturação, seguindo-se metodologia proposta por (Richards, 1954).

|           | pН                   | M.O*   | S   | Р                                       | Κ    | Ca | Mg               | AI | H+AI             | SB   | CTC                | V     | m    |
|-----------|----------------------|--------|-----|---|------|----|------------------|----|------------------|------|--------------------|-------|------|
| Trocáveis | (CaCl <sub>2</sub> ) | g dm⁻³ | mg  | dm <sup>-3</sup> mmolc dm <sup>-3</sup> |      |    |                  |    |                  |      |                    | <br>- | %    |
|           | 5,2                  | 9,0    | 5   | 3                                       | 2    | 11 | 7                | 0  | 16               | 18,4 | 34,4               | 53    | 5    |
|           | рН                   | CE     | Ν   | O <sup>3-</sup>                         | K    | +  | Ca <sup>2+</sup> |    | Mg <sup>2+</sup> |      | SO4 <sup>2</sup> - |       | Na⁺  |
| Solúveis  | (pasta)              | dS m⁻¹ |     |   |      |    |                  |    | mmolc l          |      |                    |       |      |
|           | 5,87                 | 0,34   | 1,4 | 8                                       | 0,13 | 3  | 0,75             |    | 0,48             |      | 0,41               |       | 0,66 |

Tabela 3. Caracterização química do solo utilizado no experimento

#### 3.2.3 Construção e calibração dos lisímetros

Os lisímetros foram construídos a partir de vasos com capacidade para 250 L, portanto seguem as mesmas características dos utilizados para cultivo das plantas de pinhão-manso.

Os lisímetros foram confeccionados com sistema de pesagem direta, utilizando-se células de carga que suportavam diretamente todo o peso do sistema. Dessa forma, considerando que todo o sistema apresentava peso aproximado de 550 kg (vaso preenchido com solo, planta, água, sistema de apoio e drenagem), cada lisímetro foi composto por três células de carga com capacidade nominal para 200 kg, as quais quando combinadas resultaram num total de 600 kg. Ao todo foram construídos quatro lisímetros, todos com as mesmas características. O ponto de apoio das células, conforme pode ser visualizado na Figura 4B, foi confeccionado por meio da utilização de parafusos M8 e aço trefilável de 32 mm cortado em pedaços de 8 cm.

O sistema de pesagem dos lisímetros foi construído utilizando células de carga da marca HBM<sup>®</sup>, modelo Z6FC3 200kg (Figura 4A). Conforme especificações da célula de carga, a mesma suporta uma carga máxima de 300 kg sem que haja ruptura em seu mecanismo de pesagem. Portanto, durante o monitoramento das plantas de pinhão-manso, no caso de haver ocasionalmente alguma sobrecarga, estas deverão suportar este excesso com facilidade.



Figura 4. Vista lateral e célula de carga com ponto de apoio associado.

Construiu-se uma estrutura triangular, fixando-se uma célula de carga em cada vértice para compor o mecanismo de pesagem. A estrutura foi colocada sobre piso de concreto tomando-se o devido cuidado para que a mesma permitisse que as três células ficassem em nível. Posteriormente, sobre as células foi colocado uma base que serviu de suporte para o acomodamento do vaso onde foi cultivado o pinhão-manso. Na Figura 5 está apresentado a estrutura triangular com as células de carga fixadas (A), a base de apoio para o vaso (B) e a estrutura lisimétrica montada (C e D).



**Figura 5.** Base triangular com células de carga fixadas (A); base de apoio para vaso de 250L (B); lisímetro com vaso e sem o preenchimento do material solo (C); lisímetro preenchido com solo, planta de pinhão manso e tubo de acesso de sonda de capacitância (C).

Cada célula de carga precisa de um canal diferencial e uma porta de excitação para conexão com o sistema automático de aquisição de dados, dessa forma optou-se por fazer uma caixa de junção, unindo-se as três células de carga, assim foi possível utilizar apenas um canal diferencial por lisímetro. A união das células foi feita com cabo tipo manga 6x26 AWG.

Com base na análise dos dados da Tabela 2, e considerando o solo totalmente seco, seriam necessários cerca de 165 L de água para elevar a umidade do solo para além da capacidade de campo, ou seja, preencher os espaços porosos. Desta forma, utilizou-se 175 kg para representar a CAD do solo durante a calibração. Os 175 kg foram divididos em 29 massas padrão que foram assumidas como referência, sendo sete de 0,47 kg (0,15 mm), sete de 1,57 kg (0,50 mm), oito de 6,28 kg (2,00 mm) e sete de 15,7 kg (5,00 mm).

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 0,47; 1,57 e 6,28 kg utilizou-se a balança semianalítica da marca Shimadzu<sup>®</sup> (capacidade de 8 kg e 0,01 g de divisão), enquanto que para a confecção das massas de 15,7 kg foi utilizada a balança da marca KLD<sup>®</sup>, modelo Scala 50 (capacidade de 48,5 kg e 5 g de divisão). Depois de acertada a massa desejada nas balanças, os sacos foram hermeticamente fechados 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.

Durante a calibração, os lisímetros tiveram sua superfície coberta com lona plástica para evitar possível evaporação da água do solo. A disposição das massas durante a calibração foi realizada da maneira mais distribuída possível pela área dos lisímetros, procurando-se não as concentrar somente em um ponto.

A sequência de adição e retirada das massas nos lisímetros foi realizada intercalando-as, sendo adicionadas as massas de nº1 a 29, visando explorar melhor as características das células em cada faixa de utilização das mesmas. Posteriormente estas foram retiradas no sentido inverso. A calibração foi realizada em um lisímetro por vez. Na programação feita para o sistema de aquisição de doados foi adicionado uma chave para ligar e desligar a leitura e o armazenamento dos dados. Desta forma, sempre antes de se adicionar ou retirar uma massa, a coleta e armazenamento eram desligadas, para evitar a interferência das oscilações à adição ou retirada das massas.

# 3.2.4 Manejo da irrigação

O controle da umidade do solo nos foi realizado por meio da utilização da técnica da Frequência no Domínio do Tempo (FDR), utilizando a sonda de capacitância Diviner 2000. Para utilização do método foi necessário a instalação de um tubo de acesso, constituído de PVC e adquirido com a empresa do equipamento. Utilizou-se tubos com comprimento de 0,40 m, sendo que foram enterrados 0,30 m. A sonda de capacitância é capaz de fazer leituras de umidade em perfis de 10 cm, dessa forma, obteve-se em cada tubo três leituras de umidade por tubo de acesso instalado.

Com o intuito de se ter um maior controle na dinâmica da água no solo, também foram instaladas quatro baterias de tensiômetros nas profundidades de 0,10; 0,20 e 0,30 m. Vale ressaltar que os tensiômetros foram instalados apenas nos vasos que constituíam os lisímetros. As leituras dos tensiômetros foram realizadas por meio da utilização de transdutores de pressão e a partir destas, a umidade foi estimada por meio da equação de (Van Genutchen, 1980), apresentada na (1, com os parâmetros na Tabela 4. Os parâmetros de ajuste do modelo foram determinados por meio do software RETC, desenvolvido pelo US Salinity Laboratory – USDA (Van Genutchen *et al.*, 1991), utilizando os pares de dados obtidos na curva de retenção de água no solo.

$$\theta = \theta_{\rm r} + \frac{(\theta_{\rm s} + \theta_{\rm r})}{\left[1 + (\alpha |\gamma_{\rm m}|)^{\rm n}\right]^{\rm m}}$$
(1)

em que,

 $\theta$  ( $\psi_m$ ) – umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>;

θr – umidade volumétrica residual do solo, em m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>;

θs – umidade volumétrica do solo saturado, em m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>;

m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

α – parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa<sup>-1</sup>; e

 $\psi_m$  – potencial mátrico, em kPa.

| Tabela 4. Valores de umidade | de saturação | (θs) e residual | (θr) e dos parâ | àmetros empíricos | (a, n e m) |
|------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------|
| do modelo de van Genuchten ( | (1980)       |                 |                 |                   |            |
|                              |              |                 |                 |                   |            |

| Camada cm) | θs (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | θr (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | α (kPa⁻¹) | n      | m        |
|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|--------|----------|
| 0-20       | 0,4736                               | 0,0928                               | 0,0817    | 1,4918 | 0,329669 |
| 20-40      | 0,4737                               | 0,0998                               | 0,0657    | 1,5326 | 0,347514 |

Adotou-se sistema de irrigação localizada, via gotejamento, para suprimento da demanda hídrica das plantas. O sistema de irrigação foi composto por: tubo flexível de polietileno de 16 mm de diâmetro, utilizando gotejador espaguete com vazão nominal de 2 L.h<sup>-1</sup>, conjunto motobomba como potência de motor de 0,75 CV, válvula reguladora de pressão (20PSI), manômetro, filtros de disco e tela, tubulações de PVC.

### 3.2.4.1 Calibração dos transdutores de pressão

Acoplados aos tensiômetros foram utilizados transdutores de pressão modelo MPX5100DP piezoresistivos confeccionados em silício monolítico e processamento bipolar para fornecer uma precisão de alto nível do sinal de saída, o modelo do transdutor opera numa faixa de 0 a 100 kPa e possui autocompensação de temperatura na faixa de 0 a 85ºC. Esses foram calibrados visando monitorar a variação instantânea do vácuo no interior do extrator em função do tempo.

Em laboratório procedeu-se a calibração de 19 transdutores. Estes foram acoplados em orifícios em um tubo de PVC com diâmetro de 20 mm e, em uma das extremidades conectou-se uma bomba de vácuo e na outra um manômetro de mercúrio, visando quantificar com precisão o vácuo aplicado (Figura 6A). Em seguida conectou-se o circuito de pinos referentes a alimentação e transmissão de dados a um Datalogger CR1000. Com o sistema montado (Figura 6B), procedeu-se as aplicações de vácuo, variando a cada 76 mmHg de maneira crescente e depois decrescente, com a finalidade de verificar o efeito da histerese, testando-se uma faixa de 0 a 573 mmHg (0 a 76,4 kPa). Posteriormente os dados foram analisados e ajustados para a obtenção da equação a ser utilizada nos cálculos de tensão nos tensiômetros inseridos nos lisímetros (Figura 7).



**Figura 6.** Detalhe da bomba de vácuo e do manômetro de mercúrio acoplados nas extremidades do tubo de PVC (A) e transdutores montados e prontos para o processo de calibração (B).


Figura 7. Ajuste das equações de calibração dos transdutores de pressão

Ajustou-se a calibração com um modelo linear, apresentado pela (2, sendo o sinal emitido em mV (milivolt) e a variável resposta em vácuo (kPa), apresentando valor médio de 195,5 mV referente ao sistema sem tensão, ou seja, no momento zero de vácuo.

$$V_{kPa} = 0,0221 \text{mV} - 5,0518 \tag{2}$$

#### 3.2.5 Determinação da transpiração das plantas

A transpiração das plantas foi estimada por medidas de fluxo de seiva, onde optou-se pelo uso da do método de dissipação térmica, ou comumente conhecido como Método de Granier (Granier, 1985). O motivo da escolha do método se baseia no baixo custo de obtenção dos sensores e também por exigir um menor número de canais de saída dos sistemas automático de aquisição de dados, dessa forma, o método viabiliza a medição simultânea de um maior número de plantas.

O método de dissipação de térmica envolve a inserção perpendicular de duas sondas na mesma linha axial do ramo ou tronco, sendo que uma delas, a superior, é aquecida de a uma potência constante. A variação da temperatura em cada instante entre as duas sondas (a aquecida e a não aquecida) é ocasionada pelo transporte convectivo de calor através da seiva. A máxima diferença de temperatura entre as duas sondas significa que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo,

enquanto que a mínima diferença significa uma taxa máxima de fluxo de seiva através da área de transporte (xilema).

Na Figura 8 é mostrado de forma esquemática a instalação do sensor. Na parte superior da Figura 8 observa-se a densidade de fluxo de seiva do xilema de uma planta lenhosa.



Detalhes da sonda de dissipação de calor

**Figura 8.** Esquema do sensor de Granier inserida perpendicularmente no tronco de uma árvore. Observa-se a conexão dos termopares ao sistema de aquisição de dados e da sonda superior a uma fonte de energia. (FONTE: (Rojas, 2003))

Para determinação do fluxo de seiva, foi utilizada a equação de calibração proposta por (Granier, 1985), (3:

$$F = 118,99 \times 10^{-6} \times k^{1,231} \times SA$$
(3)

sendo: SA a área do lenho condutor da seiva bruta, dada em m<sup>2</sup>, normalmente considerada a área ocupada pelo xilema e k é o índice de fluxo calculado por meio da (4, a partir das medidas térmicas registradas por meio do sensor.

$$k = \frac{(\Delta TM - \Delta T)}{\Delta T}$$
(4)

sendo:  $\Delta TM$  (°C) a diferença máxima de temperatura entre os dois pontos de medida e  $\Delta T$  (°C) a diferença de temperatura real.

#### 3.2.6 Construção e instalação das sondas de dissipação térmica (SDT)

A sonda dissipadora de calor foi confeccionada com fio de constantan de 50 µm de diâmetro enrolado em volta de uma agulha de aço inoxidável de 0,9x25 mm, de tal forma que após o enrolamento formasse um cilindro de 1,2 mm de diâmetro e um comprimento de 10 mm. Em cada agulha foi inserido, em sua parte interior média, uma junção de termopar feita da união de fios de cobre e com o fio de constantan. Os dois termopares, unidos em série e espaçados em 10 cm são responsáveis pelo fornecimento da diferença de temperatura (Tc-Tb), a qual foi registrada por um sistema automático de aquisição de dados.

As SDT foram inseridas a 20 cm do nível do solo e espaçadas (as agulhas) em 10 cm. Os furos para inserção da cápsula de alumínio foram feitos com furadeira, utilizando-se uma broca de 1,7 mm. Tomou-se o cuidado de utilizar calda bordalesa para evitar a infecção do interior da planta com qualquer tipo de fungo.

Para inserir as sondas no tronco, previamente foi introduzida uma cápsula de alumínio com diâmetro de 1,67 mm e comprimento de 12 mm. Esta foi inserida duas semanas antes da instalação das sondas, afim de que a seção do caule perfurada tivesse tempo suficiente para cicatrização e eliminação do estresse causado por esse procedimento. Antes da instalação das SDT, foi pincelado nas agulhas uma pasta térmica para auxiliar na dissipação e uniformização do calor em volta da mesma. Para garantir que uma boa inserção da SDT foi aplicada uma camada de silicone externamente. Após a instalação das sondas um papel alumínio foi utilizado para cobrir a maior parte do tronco afim de minimizar o efeito da incidência da radiação eletromagnética sobre as medidas. Na Figura 9 apresenta-se as SDT e a instalação das mesmas no caule das plantas de pinhão-manso.



**Figura 9.** Sonda de dissipação térmica construída (A); SDT ao lado da capsula de alumínio (B); abertura dos furos para inserção da cápsula de alumínio (C); inserção da cápsula de alumínio no interior do tronco (D); inserção da SDT, já com a pasta térmica, no interior da cápsula de alumínio (E); papel alumínio protegendo a SDT minimizar o efeito da incidência da radiação eletromagnética sobre as medidas (F).

O aquecimento da sonda superior ocorreu por meio da resistência criada pelo fio de constantan enrolado na parte externa da agulha. Para o aquecimento foram construídas fontes de corrente ajustáveis, com possibilidade de conexão de até seis SDT, com os elementos aquecedores conectados em série. A resistência elétrica total das sondas foi medida por meio de um multímetro e calculada a tensão a ser aplicada de acordo com, a lei de Ohm, de modo a se obter uma potência 0,1 W.

As fontes de corrente foram montadas em uma caixa PB203, onde colocouse a placa de circuito elétrico (Figura 10) com os componentes necessários para funcionamento da fonte de corrente (Figura 11). Para que fosse possível a montagem de uma fonte de corrente com seis saídas em série, foram utilizados seis LM317 TO-220, seis dissipadores DM812 MD, seis trimpots MV 2K, seis resistores 1W 22R, um diodo 1N4007, um fusível, um resistor 1/4W 1K2, um led 5MM vermelho, dois conectores PTR doze vias, sendo seis machos e seis fêmeas catorze e dois conectores PTR 2 vias, sendo um macho e um fêmea. A fonte de corrente foi alimentada com voltagem de 12V e para isso utilizou-se a mesma bateria de alimentação do sistema de aquisição de dados.



Figura 10. Diagrama elétrico da fonte de corrente.



Figura 11. Detalhe da placa elétrica com detalhes para os componentes eletrônicos.

# 3.2.7 Calibração das sondas de dissipação térmica e avaliação das plantas

As plantas localizadas nos quatro lisímetros foram utilizadas para monitorar a transpiração durante 60 dias. Durante os primeiros 15 dias o solo foi mantido com umidade próxima da condição de capacidade de vaso (CV) por meio de irrigações frequentes. Posteriormente, durante 30 dias a aplicação de água via sistema de irrigação foi suspensa e, por fim, os 15 dias finais tiveram retorno da irrigação para a recuperação da hidratação das plantas.

Também foi monitorado o estado hídrico das plantas. O monitoramento foi realizado por meio da determinação da condutância estomática de 12 folhas das plantas dos 12 vasos utilizando porômetro da marca Decagon®, modelo SC-1. Este permite realizar avaliações rápidas, não destrutivas e não requer calibração, medindo a condutância na faixa de 0 a 1000 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> com acurácia de 10%. As medições foram realizadas duas vezes por semana em cinco horários (7, 10, 13, 16 e 19 horas). Para obtenção dos pontos de leituras, dividiu-se as plantas em quatro quadrantes, amostrando-se 3 folhas por quadrantes. O valor de condutância estomática foi obtido considerando-se a média destas leituras. Esta metodologia foi adotada devido ao processo de abertura e fechamento estomático ser bastante dinâmico, respondendo à pequenas variações climáticas.

Quinzenalmente foram determinadas características biométricas das plantas, avaliando-se a altura, diâmetro da copa no sentido do maior espaçamento, diâmetro da copa no sentido de menor espaçamento e IAF. A área foliar foi determinada a por meio do método não destrutivo de dimensões foliares, aplicandose as medidas de comprimento e largura das folhas, conforme  $AF = (C \times L)^{0,9660}$  (5 proposta por (Pompelli *et al.*, 2012):

$$AF = (C \times L)^{0,9660}$$
(5)

sendo: AF a área de uma folha estimada pelo modelo (cm<sup>2</sup>); C o comprimento da folha e L a largura da folha (ambos em cm). Por fim, a área foliar total de cada planta será obtida por meio da multiplicação da área média das folhas pelo total de folhas de cada planta e o IAF determinado utilizando o espaçamento adotado na área experimental de campo (4 x 3 m).

## 3.3 Etapa II – Determinação da transpiração de pinhão-manso

#### 3.3.1 Considerações sobre o histórico da área experimental

A produção de mudas de pinhão-manso foi realizada em casa de vegetação do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" durante o período de setembro a dezembro de 2011, sendo estas transplantadas na última semana de dezembro de 2011 na área experimental da Fazenda Areão (FAR). Detalhes sobre a produção das mudas podem ser encontradas em (Junior, 2011).

Após atingir porte para ir para o campo, as mudas foram transplantadas em covas abertas, com dimensões aproximadas de 0,40x0,40x0,50 m, por uma broca escavadeira acoplada a um trator. As plantas foram dispostas no espaçamento de 3 m entre plantas e 4 m entre linhas.

Os estudos iniciais na área experimental foram realizados por (Flumignan, 2012) e (Lena, 2013). Na área experimental foi cultivado o pinhão-manso irrigado por pivô central (1 ha), gotejamento (0,5 ha) e sem irrigação (0,5 ha) Figura 12. Lisímetros foram construídos e alocados aproximadamente no centro de cada área (Flumignan, 2012) para determinação da evapotranspiração do pinhão-manso. 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".



Figura 12. Croqui da área experimental

Os lisímetros foram projetados de forma a apresentar sua área útil semelhante àquela destinada à cultura. Assim, para o espaçamento 4 x 3 m, que apresenta 12 m<sup>2</sup> para cada planta, os tanques dos lisímetros foram projetados com 1,955 m de raio interno, o que resultou nos mesmos 12 m<sup>2</sup>. Os lisímetros foram construídos com profundidade efetiva de solo de 1,3 m. 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. Portanto, os reservatórios de drenagem possuem 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 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 saída de dados foi programada par ser realizada a cada dez minutos, desta forma, considerando-se o intervalo de leitura (2 s) e os intervalos de saída 300 leituras são utilizadas.

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 modelo M-10T no módulo de pesagem SADEL-10CF. O outro foi confeccionado utilizando células de carga da marca HBM®, modelo RTNC3/10T associada ao suporte RTN/22T/VEM.

Na Figura 13 é possível visualizar as células de carga e a planta de pinhãomanso sendo cultivada nos lisímetros. Detalhes de construção dos lisímetros podem ser obtidos em (Flumignan, 2012).



**Figura 13.** Vista superior das células de carga da marca Alfa Instrumentos (A) e da marca HBM (B); Planta de pinhão-manso cultivada no lisímetro instalado na área de irrigação localizada no primeiro e quarto ano de cultivo (C e D, respectivamente).

# 3.3.2 Caracterização da área experimental

Após devida calibração em casa de vegetação, os sensores foram instalados em plantas no campo para determinar as taxas de transpiração. Nesse sentido, utilizou-se a área experimental da FAR em pomar de pinhão-manso com quatro anos de idade. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Cwa, denominado tropical de altitude sendo caracterizado por grandes volumes de chuvas no verão e por estiagem no inverno, com precipitação média anual de 1.328 mm (Angelocci *et al.*, 2002).

A área experimental possui uma estação meteorológica automática que dispõe de um sistema automático de aquisição de dados (Datalogger Campbell Scientific<sup>®</sup> modelo CR1000) para leitura e armazenamento de dados dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar (Termohigrômetro, Modelo HMP45C, Marca Vaisala<sup>®</sup>), radiação solar global (Piranômetro, Modelo CMP3, Marca Kipp & Zonen<sup>®</sup>), velocidade e direção do vento (Anemômetro sônico, Modelo WindSonic 4, Marca

Gill<sup>®</sup>), pressão atmosférica (Barômetro, Modelo PTB 110, Marca Vaisala<sup>®</sup>), saldo de radiação (Saldo radiômetro, Modelo NR-LITE, Marca Kipp & Zonen<sup>®</sup>) e chuva (Pluviômetro, Modelo TE525MM, Marca Texas Electronics<sup>®</sup>). A área gramada da estação meteorológica recebe roçagens frequentes e todos os sensores são submetidos à manutenção mensal ou bimestral, seguindo as recomendações dos fabricantes. O relatório de dados da estação meteorológica é fornecido a cada 15 min e em escalas horária e diária.

Antes do desenvolvimento da Etapa II, foi realizado uma completa revisão de todos os aspectos que englobam a estação meteorológica, visando a obtenção de dados confiáveis e de qualidade.

3.3.3 Tratamentos, delineamento estatístico e controle da umidade do solo

O pinhão-manso foi cultivado sob condições distintas de irrigação, dessa forma, a área experimental apresentou 3 tratamentos de irrigação, a saber: Tratamento 1 - Irrigação por Pivô Central; Tratamento 2 – Irrigação Localizada (gotejamento) e; Tratamento 3 – Sem irrigação. Em cada tratamento de irrigação foram adotados 3 tratamentos de poda, sendo eles: Tratamento 1 – sem poda; Tratamento 2 – poda a 1,5 m de altura e 1,5 m de diâmetro de copa e; Tratamento 3 – poda a 1,0 m de altura e 1,0 m de diâmetro de copa. A combinação destes tratamentos possibilitou a adoção de um delineamento aleatorizado em blocos.

Em cada tratamento (irrigação e poda) foram amostradas três plantas com a adoção de quatro repetições, totalizando 36 SDT (3 Irrigações, 3 Podas e 4 repetições), nas quais os sensores foram instalados em espaçamento de acordo com o descrito no item 3.2.6.

Os sensores de fluxo de seiva foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados mesmo modelo de sistema de aquisição de dados (Datalogger Campbell Scientific<sup>®</sup> modelo CR1000), porém, devido a exigência de muitos canais utilizou-se dois multiplexadores Campbell Scientific<sup>®</sup>, modelo AM16/32. As amostragens de leituras foram realizadas a cada 30 segundos e as médias foram armazenadas a cada 15 minutos. Na Figura 14, apresenta-se o sistema de aquisição de dados com os sensores de fluxo de seiva conectados.



Figura 14. Sistema de aquisição de dados com os sensores de fluxo de seiva conectados.

# 3.3.4 Caracterização do solo e da água de irrigação

O solo da experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho eutrófico, conforme classificação (Embrapa, 2013). Na Tabela 5 estão apresentados os parâmetros físicos e a caracterização química do solo determinados a partir de amostras compostas coletadas aleatoriamente na área em que o experimento foi implantado. As análises foram realizadas no Pirasolo laboratório agrotécnico Piracicaba S/C Ltda, com sede em Piracicaba-SP.

| Químicos |   |  |  |  |   |   |  |  |  |  |  |
|----------|---|--|--|--|---|---|--|--|--|--|--|
| Camada   | pH<br>(CaCl <sub>2</sub> )  | M.O.*  | N  | Р  | S<br>(SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )   | K⁺  | Ca <sup>2+</sup>   | Mg <sup>2+</sup>   | H+AI   |  |  |
| m        | . ,   | g dm⁻³   | mg kg⁻¹  | mg   | dm <sup>-3</sup>  |   | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>   |  |  |  |  |
| 0-0,2    | 6,0   | 18   | 1120   | 10   | 26  | 2,5   | 55   | 18   | 20   |  |  |
| 0,2-0,4  | 5,8   | 9  | 840  | 2  | 32  | 1,2   | 47   | 21   | 20   |  |  |
| 0-0,2    | 5,5   | 18   | 1120   | 18   | 22  | 1,3   | 49   | 13   | 25   |  |  |
| 0,2-0,4  | 5,5   | 11   | 980  | 4  | 26  | 1,0   | 44   | 12   | 25   |  |  |
| Físicos  |   |  |  |  |   |   |  |  |  |  |  |
|          | A   | rgila  | ę  | Silte  | Ar  | eia   | C  | Classo Toxtural  |  |  |  |
|          |   |  | g k  | g <sup>-1</sup>  |   |   | U  |  | Turai  |  |  |
| 0-0,2    |   | 486  |  | 259  | 2   | 55  |  | Argilosa   |  |  |  |
| 0,2-0,4  |   | 644  |  | 162  |   | 195   |  | Muito Argilosa   |  |  |  |
| 0-0,2    |   | 541  |  | 209  |   | 250   |  | Argilosa   |  |  |  |
| 0,2-0,4  |   | 614  |  | 206  | 180   |   | Muito Argilosa   |  |  |  |  |
|          | Camada<br>m<br>0-0,2<br>0,2-0,4<br>0-0,2<br>0,2-0,4<br>0-0,2<br>0,2-0,4<br>0-0,2<br>0,2-0,4 | Camada pH<br>(CaCl <sub>2</sub> )<br>m<br>0-0,2 6,0<br>0,2-0,4 5,8<br>0-0,2 5,5<br>0,2-0,4 5,5<br>0,2-0,4 5,5<br>0,2-0,4 5,5 | Camada         pH<br>(CaCl <sub>2</sub> )         M.O.*           m         g dm <sup>-3</sup> 0-0,2         6,0         18           0,2-0,4         5,8         9           0-0,2         5,5         18           0,2-0,4         5,5         11           Argila           0-0,2         486           0,2-0,4         644           0-0,2         541           0,2-0,4         614 | Químic           Camada         pH<br>(CaCl <sub>2</sub> )         M.O.*         N           m         g dm <sup>-3</sup> mg kg <sup>-1</sup> 0-0,2         6,0         18         1120           0,2-0,4         5,8         9         840           0-0,2         5,5         18         1120           0,2-0,4         5,5         11         980           0-0,2         5,5         11         980           Físico           Argila          g k           0-0,2         486         644           0-0,2         541         1           0,2-0,4         614         541 | $\begin{array}{c c c c c } & & & & & & & & & & & & \\ \hline Camada & & & & & & & & & & & & \\ \hline (CaCl_2) & & & & & & & & & & & \\ \hline m & & & & & & & & & & & \\ \hline m & & & & & & & & & & & \\ \hline 0-0,2 & & & & & & & & & \\ \hline 0-0,2 & & & & & & & & & \\ \hline 0-0,2 & & & & & & & & & \\ \hline 0-0,2 & & & & & & & & & \\ \hline 0-0,2 & & & & & & & & & \\ \hline & & & & & & & & &$ | $\begin{array}{c c c c c c c } \hline Qu{(micos} & Qu{(micos} & \\ \hline Camada & pH & M.O.^* & N & P & S & \\ \hline (CaCl_2) & M.O.^* & ng kg^{-1} &mg dm^{-3} & \\ \hline 0-0,2 & 6,0 & 18 & 1120 & 10 & 26 & \\ \hline 0,2-0,4 & 5,8 & 9 & 840 & 2 & 32 & \\ \hline 0-0,2 & 5,5 & 18 & 1120 & 18 & 22 & \\ \hline 0-0,2 & 5,5 & 11 & 980 & 4 & 26 & \\ \hline & & F & F & F & \\ \hline & & & & & & & \\ \hline 0-0,2 & 486 & 259 & 28 & \\ \hline 0,2-0,4 & 644 & 162 & 18 & \\ \hline 0-0,2 & 541 & 209 & 28 & \\ \hline 0,2-0,4 & 614 & 206 & 18 & \\ \hline \end{array}$ | $\begin{array}{c c c c c c } \hline \mbox{Químicos} & \begin{tabular}{ c c c c } \hline P & \begin{tabular}{ c c c c } \hline P & \begin{tabular}{ c c c c } S & M.O.* & N & P & \begin{tabular}{ c c c c } S & \begin{tabular}{ c c c } S & \end{tabular} & tabuar$ | $\begin{array}{c c c c c c } \hline Químicos & Químicos & \\ \hline Camada & pH & M.O.* & N & P & S & K^+ & Ca^{2+} \\ \hline m & g dm^{-3} & mg kg^{-1} &mg dm^{-3} & & \\ \hline 0-0,2 & 6,0 & 18 & 1120 & 10 & 26 & 2,5 & 55 \\ \hline 0,2-0,4 & 5,8 & 9 & 840 & 2 & 32 & 1,2 & 47 \\ \hline 0-0,2 & 5,5 & 18 & 1120 & 18 & 22 & 1,3 & 49 \\ \hline 0,2-0,4 & 5,5 & 11 & 980 & 4 & 26 & 1,0 & 44 \\ \hline & & Físicos & & \\ \hline Argila & Silte & Areia & Cl \\ \hline 0-0,2 & 486 & 259 & 255 & 0 \\ \hline 0,2-0,4 & 644 & 162 & 195 & M \\ \hline 0-0,2 & 541 & 209 & 250 & \\ \hline 0,2-0,4 & 614 & 206 & 180 & M \\ \hline \end{array}$ | $\begin{array}{c c c c c c c } \hline Químicos & Químicos & & & & \\ \hline Camada & pH & M.O.* & N & P & S & K^+ & Ca^{2+} & Mg^{2+} & \\ \hline m & g dm^{-3} & mg kg^{-1} &mg dm^{-3} & & & \\ \hline 0-0,2 & 6,0 & 18 & 1120 & 10 & 26 & 2,5 & 55 & 18 \\ \hline 0,2-0,4 & 5,8 & 9 & 840 & 2 & 32 & 1,2 & 47 & 21 \\ \hline 0-0,2 & 5,5 & 18 & 1120 & 18 & 22 & 1,3 & 49 & 13 \\ \hline 0,2-0,4 & 5,5 & 11 & 980 & 4 & 26 & 1,0 & 44 & 12 \\ \hline & & & & & & \\ \hline Físicos & & & & & \\ \hline 0-0,2 & 486 & 259 & 255 & Argilo \\ \hline 0,2-0,4 & 644 & 162 & 195 & Muito Arg \\ \hline 0-0,2 & 541 & 209 & 250 & Argilo \\ \hline 0,2-0,4 & 614 & 206 & 180 & Muito Arg \\ \hline \end{array}$ |  |  |

**Tabela 5.** Atributos químicos e físicos do solo da área de implantação do experimento

\*Matéria Orgânica

A água utilizada para irrigação teve sua origem do rio Piracicaba, sendo que esta foi bombeada para um reservatório próximo a área experimental e, posteriormente, utilizada nos sistemas de irrigação. De acordo com a análise da qualidade da água referente às suas características físico-químicas, apresentado na Tabela 6, classificou-se a água de irrigação como C1, ou seja, com baixo risco de salinidade, característica essa que é considerada adequada ao uso para a irrigação. A análise físico-química da água de irrigação foi realizada pelo Laboratório de Ecologia Aplicada, localizada no Departamento de Ciências Florestais na ESALQ/USP.

| Parâmetros             | Símbolos           | Unidades              | Valores | Valores normais** |
|------------------------|--------------------|-----------------------|---------|-------------------|
| Condutividade Elétrica | CEa                | dS m⁻¹                | 0,05    | 0-3               |
| Cálcio                 | Ca <sup>2+</sup>   | mmolc L <sup>-1</sup> | 1,7     | 0 – 20            |
| Magnésio               | Mg <sup>2+</sup>   | mmolc L <sup>-1</sup> | 1,0     | 0 – 5             |
| Sulfato                | SO4 <sup>2-</sup>  | mmolc L <sup>-1</sup> | 11,9    | 0-20              |
| Carbonato              | CO3 <sup>2-</sup>  | mmolc L <sup>-1</sup> | 0       | 0-0,1             |
| Bicarbonato            | HCO <sup>3-</sup>  | mmolc L <sup>-1</sup> | 15,8    | 0 – 10            |
| Nitrogênio-nitrato     | N-NO <sup>3-</sup> | mg L <sup>-1</sup>    | 0,8     | 0 – 10            |
| Nitrogênio amoniacal   | N-NH <sup>3+</sup> | mg L <sup>-1</sup>    | 0,1     | 0 – 5             |
| Fosforo                | Р                  | mg L <sup>-1</sup>    | 0,06    | 0 – 1             |
| Potássio               | К                  | mg L <sup>-1</sup>    | 2,3     | 0 – 2             |
| Acidez                 | рН                 | -                     | 6,8     | 6,0 - 8,5         |
| Dureza total           | -                  | mg L⁻¹                | 12,8    | 500               |
| Classificação*         | C1                 |                       |         |                   |

Tabela 6. Resultados da análise físico-química da água utilizada para irrigação

\*(Uccc, 1975); \*\*(Ayers e Westcot, 1999)

## 3.3.5 Irrigação

#### 3.3.5.1 Sistemas de irrigação

O sistema de irrigação localizado, foi composto por tubogotejador autocompensante da marca Nandaanjain, modelo NaanPC 25, apresentando diâmetro de 16 mm com espaçamento entre emissores de 0,50 m e vazão nominal de 2,5 L h<sup>-1</sup>. A área irrigada por gotejamento foi dividida em três setores, sendo os mesmos acionados automaticamente por meio de válvulas de controle elétrico/hidráulico. O tempo de irrigação foi controlado por meio de um programador

de irrigação (Figura 15), ao qual acionava as válvulas de maneira sequenciada de acordo com a demanda hídrica da cultura. Salienta-se que na entrada de cada setor foi instalado filtro de disco de 120 mesh com capacidade de filtragem para 3 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

O bombeamento da água para o sistema de irrigação foi realizado por meio de uma bomba centrífuga KSB, modelo Hydrobloc C3000NT, com potência de 3 CV. Para evitar que o sistema parasse devido a problemas elétricos ou mecânicos na bomba, uma segunda bomba centrífuga de igual marca e modelo foi instalada em paralelo.

Após o conjunto motobomba foram instalados dois filtros de areia, dimensionados de acordo com a vazão e pressão necessárias ao sistema, com o objetivo de evitar o entupimento dos emissores. O processo de retrolavagem dos filtros foi feito de forma automática, realizado por meio de quadro de comando que enviava sinais elétricos aos solenoides. Os solenoides por sua vez abriam a válvula de três vias, sendo uma em cada filtro, invertendo o fluxo e retirando as impurezas depositadas na areia.



Figura 15. Controlador de irrigação utilizado para acionar as válvulas dos setores da área com gotejamento.

O sistema de pivô central (Figura 16A) da área experimental possui uma área irrigada de 10,50 ha, desconsiderando o canhão acionado. O raio total irrigado é de aproximadamente 183 m e vazão de 90 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. A velocidade máxima da última torre é de 177 m/h, esta é obtida ajustando-se o percentímetro a 100%, com esse ajuste o pivô central aplica uma lâmina bruta de 4,4 mm, com tempo de percurso total de pouco mais de cinco horas. Cabe ressaltar que o pivô central localizada na FAR foi uma doação da empresa Irrigabrás ao Departamento de Engenharia de Biossistemas (ESALQ/USP).

Os aspersores/sprays são espaçados em dois metros, alterando-se a vazão dos mesmos para garantir a aplicação da mesma lâmina ao longo ao longo do raio irrigado do pivô central. Foram instalados reguladores de pressão de 20 PSI para garantir uma maior uniformidade de distribuição. Considerando as perdas de carga envolvidas no sistema juntamente com a pressão de serviço dos aspersores e canhão hidráulico, a altura manométrica foi calculada em 6,5 kgf cm<sup>-2</sup>. Dessa forma, o pivô é abastecido por um conjunto motobomba com potência de 30 CV (Figura 16B).



Figura 16. Pivô central em funcionamento atendendo a demanda hídrica do pinhão-manso (A) e motobomba utilizada para atender a vazão e pressão do pivô central (B).

3.3.5.2 Manejo da irrigação e monitoramento da umidade no solo

A quantidade de água a ser aplicada nas áreas irrigadas foi determinada por meio da evapotranspiração obtida pelos lisímetros de pesagem instalados na área experimental. De posse dos valores de evapotranspiração, a lâmina a ser reposta à cultura foi obtida de acordo com as eficiências de aplicação de cada sistema de irrigação (gotejamento e pivô central). O tempo de irrigação para o gotejamento foi obtido dividindo-se o valor da lâmina pela intensidade de aplicação dos emissores (1,25 mm h<sup>-1</sup>). No caso do pivô central, o tempo de irrigação foi obtido

ajustando o percentímetro do mesmo para a lâmina desejada. O valor de porcentagem a ser posto no relè foi obtido por meio da (6, desenvolvida com os dados da relação percentímetro x lâmina (Figura 17) fornecimento pelo fabricante do pivô central.

$$P = 437,52 \times (L)^{-1}$$
(6)

sendo: P o valor do percentímetro (%) e L a lâmina (mm).



Figura 17. Ajuste da equação para obtenção do ajuste do percentímetro para irrigação no pivô central.

O monitoramento da umidade do solo foi feito por meio do uso do princípio da Reflectrometria no Domínio da Frequência (FDR), utilizando a sonda de capacitância Diviner 2000, da marca Sentek<sup>®</sup>. O controle da umidade por esta metodologia foi realizado instalando-se um tubo de acesso em cada lisímetro de pesagem, no total de seis tubos instalados, e outros 10 tubos em toda a área experimental, sendo seis tubos na área de irrigação localizada, dois na área de irrigação por pivô central e outros dois tubos na área sem irrigação. Os tubos foram instalados a uma profundidade de 1,20 m e o equipamento fornecia os valores de umidade em intervalos de 0,10 m. A (7 foi utilizada para conversão dos valores de frequência para umidade do solo conforme recomendação do fabricante:

# $Fr = 0,2746 \times U^{0,3314}$

sendo: Fr a escala de frequência (adimensional) e U o conteúdo volumétrico de água no solo (%).

Os tubos de acesso foram instalados com trados especiais, adquiridos com o fornecedor do equipamento, e posicionados aproximadamente a 0,50 m de distância do caule das plantas (Figura 18Figura 18).



Figura 18. Tubos de acesso instalados nos lisímetros.

Além do uso da Diviner 2000, monitorou-se a umidade do solo por meio da medida de tensões obtidos em tensiômetros instalados a 0,20; 0,40 e 0,60 m de profundidade, na linha de plantio e a uma distância de aproximadamente 0,50 m do caule das plantas. Aos tensiômetros foram acoplados transdutores de pressão modelo MPX5100DP, devidamente calibrados na Etapa I, conforme descrito no item 3.2.4.1. As leituras foram feitas por um sistema automático de aquisição de dados e após obtenção dos valores a tensão, potencial matricial da água no solo ( $\Psi$ m), foi obtido por meio da (8.

$$\Psi_{m=L_{t}} \pm h_{c}$$

sendo:  $\Psi_m$  o potencial matricial da água no solo, em kPa; L<sub>t</sub> a leitura do transdutor de pressão, em kPa e; h<sub>c</sub> a pressão equivalente à altura da coluna de agua no tensiômetro, em kPa.

A estimativa da umidade foi realizada por meio do modelo proposto por

$$\theta = \theta_{r} + \frac{(\theta_{s} + \theta_{r})}{[1 + (\alpha | y_{r}|)^{n}]^{m}}$$

(Van Genutchen, 1980), apresentado na  $[1+(\alpha|\gamma_m|)^n]$  (1. Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros de ajuste do modelo determinados por meio do software RETC, desenvolvido pelo US Salinity Laboratory – USDA (Van Genutchen et al., 1991), utilizando os pares de dados obtidos na curva de retenção de água no solo, bem como os valores de umidade saturada ( $\theta_s$ ), umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), umidade residual ( $\theta_r$ ) e a capacidade de armazenamento da água no solo (CAD), obtidas da curva de retenção realizada na área com irrigação por pivô central, irrigação localizada e sem irrigação.

**Tabela 7.** Dados e resultados do ajuste da curva de retenção elaborada segundo o modelo de van Genuchten (1980), sendo Os a umidade na saturação (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), OCC a umidade na capacidade de campo (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), OPMP a umidade no ponto de murcha permanente (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), Or a umidade residual (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), CAD a capacidade de água disponível (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) e, por fim,  $\alpha$  (cm<sup>-1</sup>), n e m (adimensionais) são parâmetros de ajuste

| Tratamento           | Camada (cm) | θs   | θ <sub>cc</sub> | $\Theta_{PMP}$ | θr   | CAD  | α      | n      | m      |
|----------------------|-------------|------|-----------------|----------------|------|------|--------|--------|--------|
| _                    | 0 – 20      | 0,48 | 0,35            | 0,31           | 0,31 | 0,04 | 0,1129 | 1,3729 | 0,2716 |
| vô<br>itra           | 20 – 40     | 0,52 | 0,44            | 0,4            | 0,37 | 0,04 | 0,1002 | 1,2425 | 0,1952 |
| E Di                 | 40 – 60     | 0,52 | 0,46            | 0,39           | 0,06 | 0,07 | 0,1447 | 1,0433 | 0,0415 |
| 0                    | 60 – 130    | 0,53 | 0,41            | 0,35           |      | 0,06 | 0,3121 | 1,0522 | 0,0496 |
|                      | 0 – 20      | 0,49 | 0,37            | 0,32           | 0,31 | 0,05 | 0,0627 | 1,3999 | 0,2857 |
| la sal               | 20 – 40     | 0,52 | 0,4             | 0,35           | 0,34 | 0,05 | 0,1686 | 1,2929 | 0,2265 |
| a o                  | 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 |
|                      | 0 - 20      | 0,46 | 0,37            | 0,32           | 0,26 | 0,05 | 0,1333 | 1,1444 | 0,1262 |
| Sem<br>irriga<br>ção | 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 |

Adaptado de (Flumignan, 2012)

## 3.3.6 Poda

Para avaliação do efeito da poda na transpiração das plantas de pinhãomanso foram adotadas três diferentes podas de topo, com variações na altura de corte e no diâmetro de copa, dessa forma, os tratamentos adotados foram: Tratamento 1 – sem poda; Tratamento 2 – poda a 1,5 m de altura e 1,5 m de diâmetro de copa e; Tratamento 3 – poda a 1,0 m de altura e 1,0 m de diâmetro de copa. Adotou-se quatro repetições de cada tratamento de poda dentro dos tratamentos de irrigação. A unidade experimental foi composta por um total de nove plantas, sendo oito plantas de bordadura e uma planta útil, na qual era determinada sua transpiração. O experimento contou com 36 unidades experimentais. Cada tratamento de irrigação continha 12 unidades experimentais, sendo quatro unidades do Tratamento 1 de poda, quatro do Tratamento 2 e as quatro restantes do Tratamento 4. As unidades experimentais foram aleatorizadas em toda área de cultivo de pinhão-manso.

Para uniformizar e agilizar o processo de poda, foram construídos gabaritos com tubos de PVC de ½' com as alturas e larguras referentes a cada tratamento de poda. A poda ocorreu após a senescência total das folhas das plantas e os ramos foram retirados com o auxílio de tesouras de poda. Tomou-se o cuidado de utilizar calda bordalesa para evitar infecção da planta devido a corte que era feito. Na Figura 19 pode ser verificado a área experimental após o procedimento da poda.



**Figura 19.** Área de irrigação localizada com poda do Tratamento 3 (A); área do pivô central com poda do Tratamento 2 (B); planta cultivada no lisímetro da área sem irrigação com poda do Tratamento 2 (C) e; área sem irrigação com a poda do Tratamento 1.

3.3.7 Evapotranspiração, coeficiente de cultivo e transpiração

A evapotranspiração das plantas foi determinada por lisímetros de pesagem. Os valores de evapotranspiração foram determinados por meio da contabilização das entradas e saídas de água no sistema lisimétrico, conforme apresentado na (9:

$$ET = P + I \pm R \quad D \pm \Delta A \tag{9}$$

sendo: ET a evapotranspiração do pinhão-manso, em mm; P a precipitação, em mm; I a lâmina de água irrigada, em mm; R o escoamento superficial, em mm; D a drenagem, em mm e; ΔA a variação de armazenamento de água nos lisímetros, em mm.

Os lisímetros apresentam uma borda em torno de três centímetros, dessa forma desconsiderou o escoamento superficial R. Os valores de precipitação foram obtidos na estação meteorológica situada ao lado do experimento, ao passo que os valores de I, D e  $\Delta$ A foram obtidos com base nas características de aplicação de água dos equipamentos de irrigação e nos dados de massa dos próprios lisímetros.

De posse dos dados de evapotranspiração, os valores de coeficiente de cultivo (Kc) dos tratamentos irrigados foram determinados de acordo com a (10

$$K_{C} = \frac{ET}{ET_{0}}$$
(10)

sendo: Kc o coeficiente de cultivo, adimensional; ET a evapotranspiração do pinhãomanso, em mm dia<sup>-1</sup>; e ETO a evapotranspiração de referência, mm dia<sup>-1</sup>.

Valores horários de ET0 foram calculados no programa REF-ET (Allen, 2000) e acumulados para o total diário. Para isso foram utilizados os dados obtidos na estação meteorológica automática da Fazenda Areão (ESALQ/USP) e a estimativa foi realizada pelo método Penman-Monteith, conforme a padronização disposta em (Asce, 2005)

A transpiração das plantas foi determinada com a utilização do método de dissipação térmica, assim como realizado na Etapa I.

## 3.3.8 Instalação dos sensores de fluxo de seiva

A instalação dos sensores na área experimental seguiu os mesmos procedimentos discutidos no item 3.6.2. No entanto, para possibilitar a alimentação da fonte de corrente para aquecimento dos sensores, utilizou-se uma fonte chaveada de 12V, alimentada com uma voltagem de 127V. Esse procedimento foi possível pois a área experimental possui rede elétrica ao lado do experimento.

Cada fonte de corrente possibilitou o aquecimento de seis sensores de fluxo de seiva, como foram 36 plantas a serem monitoradas, foram necessários a instalação de seis unidades de aquecimento (Figura 20), sendo duas instaladas na área irrigação por pivô central, duas na área com irrigação localizada e, finalmente, mais duas na área sem irrigação.



**Figura 20.** Unidade de aquecimento das SDT, composta de fonte chaveada, disjuntor de 20A e fonte de corrente (A) e unidade de aquecimento ao lado de planta útil no tratamento do pivô-central (B).

#### 3.3.9 Avaliações das plantas de pinhão manso

O crescimento das plantas foi avaliado em cada tratamento por meio de medições da altura da planta (m), do diâmetro médio de copa (m) e do volume de copa (m<sup>3</sup>). A determinação da altura foi definida como a medida entre a superfície do solo e a última folha emergida no ápice da planta. Para o diâmetro médio de copa, tomou-se como ponto de avaliação o valor médio entre o diâmetro de copa no sentido do maior espaçamento (entrelinha de plantio) e o diâmetro de copa no sentido de menor espaçamento (linha de plantio). O volume de copa foi estimado pela aproximação do volume de um cilindro de base elíptica (Laviola *et al.*, 2010):

$$V_{CODA} = [\pi \times (D_1/2) \times (D_2/2) \times h$$
(11)

sendo:  $V_{copa}$  o volume de copa, em m<sup>3</sup>; D<sub>1</sub> o diâmetro de copa no maior espaçamento, em m; D<sub>2</sub> o diâmetro de copa no menor espaçamento, em m; e h a altura da planta, em m.

As medições do índice de área foliar (IAF) foram realizadas com o auxílio o equipamento LAI-2200 da marca LI-COR<sup>®</sup>. Esse equipamento foi desenvolvido para se estimar o IAF de maneira mais prática e de forma precisa, desde que manejado de maneira adequada. Dessa forma, para garantir boa qualidade dos dados utilizouse a calibração realizada por (Lena *et al.*, 2016) e apresentada na (12:

$$IAF_{e} = 0,8904 \times IAF_{r}$$
(12)

A condutância estomática das plantas foi determinada com a utilização de um porômetro portátil da marca Decagon. A condutância estomática foi realizada nos mesmos horários das determinações na Etapa I, seguinte a mesma metodologia.

## 4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### 4.1 Resultados referentes à Etapa I

#### 4.1.1 Condições meteorológicas no interior da casa de vegetação

Durante o decorrer da etapa de calibração do método de dissipação térmica para determinação da transpiração das plantas de pinhão–manso, a temperatura máxima (Tmax) variou de 26,24 a 39,12°C e a Tmin teve variação entre 10,42 a 21,40°C. Considerando os extremos da amplitude térmica, verificou-se uma variação entre 13 a 27°C. Os dados de temperatura foram obtidos por meio do sensor HPM45C (Vaisala<sup>®</sup>), instalado a 2 m de altura, no interior da casa de vegetação, e próxima ao experimento. O mesmo sensor permitiu a coleta de dados de umidade relativa do ar, sendo que os valores máximo e mínimo verificados foram de umidade máxima (URmax) variou de 65 a 95% e a umidade mínima (URmin) variou de 25 a49%.

Valores de radiação solar (Rs) apresentou valor máximo diário de 481 W m<sup>-2</sup>.

As variações de temperaturas, umidade relativa do ar e radiação solar são apresentadas nas Figura 21, Figura 22 eFigura 23.



Figura 21. Variação da temperatura mínima e máxima (Tmin e Tmax) no interior da casa de vegetação ao longo dos 60 dias de condução da Etapa I.



Figura 22. Variação da umidade relativa mínima e máxima (URmin e URmax) no interior da casa de vegetação ao longo dos 60 Dias de condução da Etapa I.



Figura 23. Variação da radiação solar mínima e máxima (Rsmin e Rsmax) no interior da casa de vegetação ao longo dos 60 Dias de condução da Etapa I.

## 4.1.2 Calibração dos lisímetros

Durante a calibração dos lisímetros, realizado a noite, a temperatura do ar variou entre 22,9 e 24,2°C e a umidade relativa entre 66,2 e 72,3%. Por se encontrar em casa de vegetação a velocidade do vento foi considerada nula.

Os coeficientes angulares encontrados nos diferentes lisímetros apresentaram valores de 305,02; 305,42; 306,35 e 305,85 (kg (mV  $V^{-1})^{-1}$ ), para os lisímetros 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Considerando-se os altos coeficientes de determinação obtidos (Figura 24), o modelo de regressão linear foi adequadamente a relação entre a massa acumulada e a média do sinal de saída das células de carga (R2≈ 1), evidenciando o comportamento linear existente entre estas variáveis. 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.



Figura 24. Ajuste das equações de calibração dos lisímetros utilizados na calibração das SDT.

Os erros foram pouco dispersos em torno do zero sendo observada variação de -0,21 até 0,23 kg, para o lisímetro 1. Valores de erro variando entre - 0,42 a 0,57 kg foram observados para o lisímetro 2, para o lisímetro 3 os erros foram de -0,46 a 0,42 kg e valores de erro entre 0,39 a ,48 kg foram verificados no lisímetro 4. As dispersões dos erros em torno do zero podem ser observadas na Figura 25.



Figura 25. Erros entre a massa acumulada e a determinada na calibração dos lisímetros utilizados na calibração das SDT.

## 4.1.3 Conteúdo de água no solo

Na Figura 26 está apresentado a variação do conteúdo de água no solo ao longo do período de calibração das sondas de dissipação térmica, considerando as profundidades de 0,10; 0,20 e 0,30 m. Durante os primeiros 15 dias de calibração o solo foi mantido com umidade próxima da condição de capacidade de vaso (CV) por meio de irrigações frequentes. Posteriormente, durante 30 dias promoveu uma redução da umidade do solo devido a supressão da irrigação e, por fim, os 15 dias finais tiveram retorno da irrigação para a recuperação da hidratação das plantas.

Ao longo dos primeiros quinze dias de avaliação as irrigações ocorreram de forma frequente, com adoção de um turno de rega de quatro dias, ou sempre que a umidade na profundidade de 0,20 m atingisse 0,180 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Vale ressaltar, que como os vasos encontravam-se coberto por lona plástica, a perda de água somente ocorria por transpiração das plantas, dessa forma esta umidade crítica para a profundidade de 0,20 m não foi atingida em nenhum momento, desconsiderando o período de supressão de irrigação.

É possível verificar que entre o 15º e 45º dias, houve uma diminuição acentuada da umidade do solo. Este período correspondeu à supressão da irrigação, equivalente a 30 dias. Em nenhuma das profundidades a umidade chegou a atingir o ponto de murcha permanente. Após o 45º dia houve o retorno da irrigação, e a umidade do perfil voltou a subir. Neste período foram realizadas três irrigações em dias consecutivos, para evitar uma brusca elevação do potencial da água no solo.



**Figura 26.** Conteúdo de água no solo, em base volume, ao longo dos 60 Dias de condução da Etapa I, calibração do método de dissipação térmica, nas profundidades de 0,1; 0,2 e 0,3 m.

4.1.4 Avaliação das características biométricas das plantas

As avalições biométricas das plantas, no que se refere a altura das plantas, diâmetro das copas e índice de área foliar foram realizadas quinzenalmente.

Os valores de diâmetros de caule tiveram uma variação entre 30 a 67 mm, não se alterando ao longo dos 60 dias de condução da calibração do fluxo de seiva.

Ao longo dos 60 dias da Etapa I, não foram verificados grandes incrementos no desenvolvimento das plantas, dessa forma optou-se por utilizar a apresentação dos resultados, considerando as variáveis Altura (h), diâmetro da copa, volume da copa e índice de área foliar (IAF), em tabelas. Como o objetivo da estrutura experimental é apenas de calibração da metodologia do método de dissipação térmica, a área experimental desta Etapa I não possui tratamentos, portanto não foi possível adequar um delineamento estatístico para analisar as variáveis biométricas, sendo adotada neste caso apenas uma estatística descritiva.

Na Tabela 8 estão apresentados os valores obtidos e a estatística descritiva nas cinco avaliações realizadas ao longo da Etapa I considerando a variável altura de planta. As plantas enumeradas como 4, 5, 6 e 7 são exatamente as plantas cultivadas nos lisímetros e utilizadas nas determinações de transpiração. O desvio padrão médio das plantas foi de 0,16 m. Verifica-se que a altura das plantas se encontram com valores homogêneos, com altura média, no final das avaliações, entre 1,9 a 2,4 m. Verificou-se que durante a supressão da irrigação não houve incremento de altura, e após o retorno um pequeno crescimento foi observado em praticamente todas as plantas. Cabe ressaltar que apesar dessas alturas, nenhuma planta atingiu o limite máximo de altura da cobertura da casa de vegetação.

Juntamente com a altura das plantas, determinou-se o diâmetro médio da copa das plantas (Tabela 9), sendo verificado um desvio padrão médio de 0,16 m, considerando-se todas as plantas. O diâmetro médio de copa variou entre 1,6 e 2,2 m.

Com posse dos valores de diâmetro de dois quadrantes da planta e da altura foi possível determinar o volume de copa pela aproximação do volume de um cilindro de base elíptica, assim os valores de volume de copa são apresentados na Tabela 10. O desvio padrão do volume de copa verificado foi de 1,21 m<sup>3</sup>, com variação entre 3,6 a 7,5 m<sup>3</sup>. Por considerar três variáveis de entrada (altura, maior diâmetro e menor diâmetro) verificou-se uma maior variabilidade nos resultados. Portanto o volume de copa é influenciado diretamente pelo desenvolvimento em conjunto da altura e do diâmetro da copa. Plantas com maiores emissões de ramos laterais tendem a apresentar um maior diâmetro de copa.

Apresenta-se na Tabela 11 os valores e a estatística descritiva para a variável índice de área folear (IAF). Verificou-se um desvio padrão médio de 0,10, com IAF médio variando entre 0,40 a 0,80. A área foliar das plantas tem influência direta sobre a transpiração, uma vez que elas funcionam com uma bomba de sucção, que "puxa" a água do solo até os estômatos, que permite a interação atmosfera-planta.

Na Etapa I, após a supressão da irrigação, verificou-se a senescência de algumas folhas, contribuindo para uma diminuição da área foliar das plantas. No entanto, esta possível queda de folhas já era prevista e não comprometeu os resultados da Etapa I.

| Avaliação     | Planta 1 | Planta 2 | Planta 3 | Planta 4 | Planta 5 | Planta 6 | Planta 7 | Planta 8 | Planta 9 | Planta 10 | Planta 11 | Planta 12 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Avallação     | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m         | m         | m         |
| 20/abril      | 2.0      | 2.2      | 2.0      | 2.3      | 2.1      | 2.1      | 2.5      | 2.1      | 1.9      | 1.8       | 2.2       | 2.0       |
| 04/maio       | 2.0      | 2.2      | 2.0      | 2.3      | 2.2      | 2.1      | 2.5      | 2.1      | 1.9      | 1.9       | 2.2       | 2.0       |
| 18/maio       | 2.1      | 2.2      | 2.0      | 2.3      | 2.3      | 2.1      | 2.7      | 2.1      | 1.9      | 2.0       | 2.3       | 2.1       |
| 01/junho      | 2.1      | 2.2      | 2.2      | 2.4      | 2.4      | 2.1      | 2.7      | 2.1      | 2.0      | 2.0       | 2.4       | 2.2       |
| 15/junho      | 2.2      | 2.3      | 2.2      | 2.6      | 2.4      | 2.2      | 2.7      | 2.1      | 2.0      | 2.0       | 2.4       | 2.2       |
| Média (m)     | 2.1      | 2.3      | 2.1      | 2.4      | 2.3      | 2.1      | 2.6      | 2.1      | 1.9      | 1.9       | 2.3       | 2.1       |
| Mediana (m)   | 2.1      | 2.2      | 2.0      | 2.3      | 2.3      | 2.1      | 2.7      | 2.1      | 1.9      | 2.0       | 2.3       | 2.1       |
| Amplitude (m) | 0.2      | 0.1      | 0.2      | 0.3      | 0.3      | 0.1      | 0.2      | 0.0      | 0.1      | 0.2       | 0.2       | 0.2       |
| Desvio Padrão | 0.1      | 0.0      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.0      | 0.1      | 0.0      | 0.0      | 0.1       | 0.1       | 0.1       |

Tabela 8. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão da altura ao longo dos 60 dias de condução da Etapa I

Tabela 9. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão do diâmetro da copa ao longo dos 60 dias de condução da Etapa I

| Avaliação     | Planta 1 | Planta 2 | Planta 3 | Planta 4 | Planta 5 | Planta 6 | Planta 7 | Planta 8 | Planta 9 | Planta 10 | Planta 11 | Planta<br>12 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|--------------|
|               | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m        | m         | m         | m            |
| 20/abril      | 1.6      | 1.8      | 1.7      | 1.9      | 1.8      | 2.0      | 2.1      | 1.7      | 1.6      | 1.8       | 1.7       | 1.8          |
| 04/maio       | 1.6      | 1.8      | 1.7      | 1.9      | 1.8      | 2.0      | 2.2      | 1.8      | 1.7      | 1.8       | 1.0       | 1.8          |
| 18/maio       | 1.6      | 1.8      | 1.7      | 2.0      | 1.9      | 2.1      | 2.2      | 1.8      | 1.9      | 1.8       | 1.8       | 1.8          |
| 01/junho      | 1.7      | 1.9      | 1.7      | 2.0      | 1.9      | 2.1      | 2.2      | 1.9      | 1.9      | 1.8       | 1.8       | 1.8          |
| 15/junho      | 1.7      | 1.9      | 1.7      | 2.0      | 2.0      | 2.2      | 2.3      | 1.9      | 1.9      | 2.0       | 1.9       | 1.9          |
| Média (m)     | 1.6      | 1.8      | 1.7      | 1.9      | 1.9      | 2.1      | 2.2      | 1.8      | 1.8      | 1.8       | 1.6       | 1.8          |
| Mediana (m)   | 1.6      | 1.8      | 1.7      | 2.0      | 1.9      | 2.1      | 2.2      | 1.8      | 1.9      | 1.8       | 1.8       | 1.8          |
| Amplitude (m) | 0.0      | 0.1      | 0.0      | 0.1      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.3      | 0.2       | 0.9       | 0.1          |
| Desvio Padrão | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1       | 0.4       | 0.0          |

| Avaliação         | Planta 1       | Planta 2       | Planta 3       | Planta 4       | Planta 5       | Planta 6       | Planta 7       | Planta 8 | Planta 9       | Planta 10 | Planta 11      | Planta 12      |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|----------------|-----------|----------------|----------------|
| Volume da<br>Copa | m <sup>3</sup> | m³       | m <sup>3</sup> | m³        | m <sup>3</sup> | m <sup>3</sup> |
| 20/abril          | 3.5            | 5.7            | 3.6            | 5.3            | 3.7            | 4.7            | 5.8            | 5.0      | 3.1            | 6.9       | 5.5            | 4.6            |
| 04/maio           | 3.5            | 5.8            | 3.6            | 5.3            | 3.7            | 4.7            | 6.1            | 5.5      | 3.3            | 7.2       | 3.2            | 4.6            |
| 18/maio           | 3.6            | 5.8            | 3.6            | 5.5            | 4.1            | 4.9            | 6.4            | 5.5      | 3.7            | 7.5       | 6.1            | 4.8            |
| 01/junho          | 3.7            | 6.0            | 4.0            | 5.6            | 4.3            | 5.0            | 6.4            | 5.8      | 3.9            | 7.5       | 6.4            | 5.0            |
| 15/junho          | 3.9            | 6.0            | 4.0            | 6.0            | 4.6            | 5.4            | 6.9            | 5.8      | 3.9            | 8.4       | 6.7            | 5.3            |
| Média (m)         | 3.7            | 5.9            | 3.8            | 5.6            | 4.1            | 5.0            | 6.3            | 5.5      | 3.6            | 7.5       | 5.6            | 4.8            |
| Mediana (m)       | 3.6            | 5.8            | 3.6            | 5.5            | 4.1            | 4.9            | 6.4            | 5.5      | 3.7            | 7.5       | 6.1            | 4.8            |
| Amplitude (m)     | 0.4            | 0.4            | 0.4            | 0.8            | 0.9            | 0.7            | 1.1            | 0.7      | 0.7            | 1.5       | 3.5            | 0.7            |
| Desvio Padrão     | 0.2            | 0.2            | 0.2            | 0.3            | 0.3            | 0.3            | 0.4            | 0.3      | 0.3            | 0.6       | 1.4            | 0.3            |

Tabela 10. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão do volume da copa ao longo dos 60 dias de condução da Etapa I

Tabela 11. Valores observados, média, mediana, amplitude e desvio padrão do IAF ao longo dos 60 dias de condução da Etapa I

| IAF<br>(adimensional) | Planta 1 | Planta 2 | Planta 3 | Planta 4 | Planta 5 | Planta 6 | Planta 7 | Planta 8 | Planta 9 | Planta 10 | Planta 11 | Planta 12 |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 20/abril              | 0.54     | 0.56     | 0.62     | 0.67     | 0.75     | 0.88     | 0.82     | 0.83     | 0.77     | 0.52      | 0.45      | 0.88      |
| 04/maio               | 0.54     | 0.56     | 0.62     | 0.67     | 0.75     | 0.78     | 0.82     | 0.83     | 0.75     | 0.52      | 0.45      | 0.64      |
| 18/maio               | 0.52     | 0.55     | 0.55     | 0.65     | 0.53     | 0.45     | 0.45     | 0.79     | 0.60     | 0.52      | 0.40      | 0.32      |
| 01/junho              | 0.40     | 0.46     | 0.52     | 0.62     | 0.50     | 0.32     | 0.45     | 0.72     | 0.53     | 0.50      | 0.33      | 0.22      |
| 15/junho              | 0.33     | 0.32     | 0.40     | 0.47     | 0.35     | 0.20     | 0.29     | 0.62     | 0.49     | 0.41      | 0.25      | 0.15      |
| Média (m)             | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.6      | 0.6      | 0.5      | 0.6      | 0.8      | 0.6      | 0.5       | 0.4       | 0.4       |
| Mediana (m)           | 0.5      | 0.6      | 0.6      | 0.7      | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.8      | 0.6      | 0.5       | 0.4       | 0.3       |
| Amplitude (m)         | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.4      | 0.7      | 0.5      | 0.2      | 0.3      | 0.1       | 0.2       | 0.7       |
| Desvio Padrão         | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.2      | 0.3      | 0.2      | 0.1      | 0.1      | 0.0       | 0.1       | 0.3       |

#### 4.1.5 Condutância estomática

Na Figura 27 apresentam-se os valores médios de condutância estomática das plantas 4, 5, 6 e 7, estas foram as plantas cultivadas nos lisímetros e utilizadas para determinação da transpiração e calibração da metodologia utilizada no projeto. Os resultados de porometria da Etapa I foram agrupados em três períodos, a saber: 1) irrigação normal; 2) supressão da irrigação; 3) retorno da irrigação. Pode-se verificar que nos períodos de irrigação os valores médios de condutância estomática foram superiores aos valores verificados no período de supressão da irrigação.

Apesar de se encontrar em casa de vegetação, os valores de condutância estomática nos períodos onde não houve restrição hídrica para as plantas foram altos, com valor máximo de 389,9 mmol/(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) no período inicial, caraterizado por irrigação frequentes, e 866,7 mmol/(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) no período de retorno de irrigação.

A transpiração das plantas ocorre por diferencial de potencial da água entre o solo, a planta e a atmosfera. Em solos bem irrigados, o potencial da água se encontra elevado, facilitando a absorção de água pelas plantas (Angellocci, 2002). Com fornecimento de água por parte do solo e com um baixo potencial da água na atmosfera, os estômatos se abrem, liberando o vapor d'água na atmosfera (Taiz e Zeiger, 2009). Nestas condições a condutância estomática é elevada, conforme verifica-se na Figura 20 A e C. A diminuição da radiação a noite, diminui a condutância estomática, como verificado nas medições as 7h da manhã e às 19h da noite.

Quando foi realizada a supressão da irrigação, a condutância estomática diminuiu (Figura 20B), mesmo com as altas demandas atmosféricas. Sem a reposição de água no solo e a absorção de água pelas plantas, o potencial da água diminuiu, promovendo a diminuição da condutância. Como mecanismo de defesa, os estômatos das plantas não abriram de maneira acentuada como quando a disponibilidade de água no solo era adequada. Vale ressaltar que a transpiração das plantas é vital para que não ocorra o colapso dos tecidos vegetal, pois além de permitir a absorção de nutrientes, a transpiração é um mecanismo de arrefecimento da planta, que para um ser imóvel é de fundamental importância (Taiz e Zeiger, 2009).


**Figura 27.** Condutância estomática (mmol/(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)) das plantas 4, 5, 6 e 7 no período de irrigação (A); supressão da irrigação (B) e retorno da irrigação (C).

Os resultados de condutância estomática apresentados anteriormente, foram obtidos considerando a média das 12 leituras realizadas nas plantas, agrupando as folhas novas e folhas velhas. Dessa forma, na XXX apresentam-se os valores de condutância estomática de folhas da base (folha velha), do terço superior e de folhas do ápice (folha nova), respectivamente, ao longo do período de condução da Etapa 1.

Os resultados obtidos analisando as folhas de forma independente, seguiram a mesma tendência de quando analisado a média de todas as folhas. De acordo com (Taiz e Zeiger, 2013) o número de estômatos por cm<sup>2</sup> de folhas novas e de folhas velhas é praticamente o mesmo, isto explica os resultados semelhantes encontrados.

Os estômatos são constituídos por duas células, conhecidas como células guardas. As células-guarda funcionam como válvulas hidráulicas multissensoriais, regulando a resistência estomática por meio de sua abertura e fechamento (Angellocci, 2002). Portanto, a abertura estomática é um processo dinâmico, respondendo a fatores ambientais, como intensidade e qualidade da luz, temperatura, condição hídrica foliar e concentração intracelular de CO<sub>2</sub> (Pimentel, 2004).



**Figura 28.** Condutância estomática (mmol/(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)) das folhas da base pertencentes às plantas 4, 5, 6 e 7 no período de irrigação (A); supressão da irrigação (B) e retorno da irrigação (C).



**Figura 29.** Condutância estomática (mmol/(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)) das folhas do terço superior pertencentes às plantas 4, 5, 6 e 7 no período de irrigação (A); supressão da irrigação (B) e retorno da irrigação (C).



**Figura 30.** Condutância estomática (mmol/(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)) das folhas da base pertencentes às plantas 4, 5, 6 e 7 no período de irrigação (A); supressão da irrigação (B) e retorno da irrigação (C).

### 4.1.6 Calibração do fluxo de seiva

Como padrão na calibração do método de dissipação térmica foram utilizados os lisímetros de pesagem descritos anteriormente. Para facilitação dos

cálculos, utilizou-se os dados de saída dos lisímetros em escala horária, dessa forma, optou-se por modificar o coeficiente linear da equação de Granier, apresentada na Eq.  $F = 118,99 \times 10^{-6} \times k^{1,231} \times SA$  (3 aproximando-se para escala diária, conforme apresentado na (13.

$$FS=0,000594 \times K^{1,231} \times AS$$
 (13)

Na Figura 31 é apresentada a relação entre a transpiração determinada por meio dos lisímetros e o fluxo de seiva calculado pela equação geral de Granier (Eq. 3) e a equação modificada (Eq. 15). O desvio médio entre o fluxo de seiva e a transpiração em escala diária para a equação geral de Granier foi de 5,04%, e o desvio para a equação modificada foi de 4,88%. Os desvios obtidos são aceitáveis, uma vez que a transpiração é um processo dinâmico, apresentando grande variabilidade espacial. De maneira geral, considera-se que, quando se está de posse de grande número de dados, desvios da ordem de 10% são perfeitamente aceitáveis (Junior, 2012).



Figura 31. Relação entre as medidas de transpiração realizadas com os lisímetros e as determinação do fluxo de seiva diário pela sonda de dissipação térmica.

(Silva *et al.*, 2004) verificaram em plantas de kiwi que a equação geral de Granier apresentou uma forte subestimativa dos valores de fluxo de seiva principalmente em condições de maior fluxo. Os autores ajustaram uma equação polinomial de grau 2 aos valores de k em relação a densidade de fluxo calculada com base em medidas lisimétricas e na área da secção condutora do caule, obtendo um coeficiente de determinação de 0,8252.(Rojas, 2003) também baseado em medidas lisimétricas verificou que o fluxo de seiva pelo método da dissipação térmica subestimou na ordem de 3% a transpiração em plantas cítricas. (Ferreira e Silvestre, 2004) ajustaram uma equação potencial com os valores de fluxo de seiva obtidos com os parâmetros originais da equação de Granier e a evapotranspiração para vinha em condições de evaporação do solo desprezível, estimada pelo método meteorológico da covariância de fluxos turbulentos, obtendo uma boa correlação (R2 = 0,84). (Vellame, 2010) constataram que o método da sonda de dissipação térmica, utilizando-se os coeficientes originais da equação de (Granier, 1985), subestimou em média 31% os valores de fluxo de seiva em escala diária.

#### 4.2 Resultados referentes à Etapa II

### 4.2.1 Condições meteorológicas

Durante o período de condução da Etapa II as variações de temperatura máxima, média e mínimas ocorreram conforme apresentadas na Figura 32.

Verificou-se que a temperatura média ao longo deste período foi de 21,98°C, sendo registrados valores de 40,45 e 1,14°C, para a temperaturas máximas e mínimas, considerando o mesmo período de avaliação. A amplitude térmica ao longo deste período teve uma média de 13,21°C, com valores máximos e mínimos, respectivamente, de 29,8 e 2,3°C. De acordo com (Saturnino *et al.*, 2005), a faixa de temperatura ótima para cultivo do pinhão-manso está entre 18 e 28,5°C, dessa forma as condições de temperatura apresentadas durante o período não foram as ideais para o cultivo do pinhão-manso, seguindo recomendação. No entanto, as menores temperaturas foram verificadas no período do inverno, momento onde as plantas se encontram em período de senescência foliar. Durante o desenvolvimento vegetativo verificou-se temperaturas acima de 28,5°C no entanto em 73% do período de desenvolvimento do experimento a temperatura se encontrou dentro da faixa ótima proposta por (Saturnino *et al.*, 2005), portanto estas baixas amplitudes térmicas não afetaram o desenvolvimento das plantas.



**Figura 32.** Comportamento diário da Temperatura máxima (Max\_Temp), temperatura média (Media\_Temp) e temperatura mínima (Min\_Temp) ao longo do período de avaliação da Etapa II.

Da mesma foram monitoradas as condições de umidade relativa do ar. Este componente climático é de grande importância, pois determina entre outros fatores a taxa de evaporação da água. Portanto, para as plantas, uma umidade relativa baixa resulta em altas taxas de transpiração.

Neste período foi verificado uma umidade relativa média em torno de 28,62%, como valor mínimo registrado de 11,74% (Figura 33).



**Figura 33.** Comportamento diário da umidade relativa máxima (Max\_UR), umidade relativa média (Media\_UR) e umidade relativa mínima (Min\_UR) ao longo do período de avaliação da Etapa II.

Com os dados de temperatura e umidade relativa diários foi possível calcular a pressão de vapor (ea), a pressão de vapor saturado (es) e o déficit de pressão de vapor (DPV), apresentados na Figura 34. O DPV é uma medida do poder evaporante do ar, tendo relação direta com os processos de evaporação, uma vez que depende do gradiente de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar , portanto quanto maior o seu valor, maior será a demanda atmosférica e consequentemente, maior a evaporação e a transpiração.



Figura 34. Comportamento diário da pressão de vapor (ea), pressão de vapor saturado (es) e déficit de pressão de vapor (DPV) ao longo do período de avaliação da Etapa II.

Durante a condução do experimento foram registrados valores médios de radiação global (Qg) 19,87 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, verificando-se um saldo de radiação médio (Rn) de 9,81 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, valores apresentados na Figura 35.



Figura 35. Comportamento diário da radiação global (Qg) e saldo de radiação (Rn) ao longo do período de avaliação da Etapa II.

Na Figura 29 apresenta-se a Normal Climatológica (NC) para o município de Piracicaba-SP em comparação com o ano de 2016. Os dados de chuva e

temperatura média foram obtidos do posto meteorológica da ESALQ/USP que tem dados desde 1917, dessa forma a NC foi obtida com dados entre o período de 1917-2015.



Figura 36. Normal Climatológica para o município de Piracicaba-SP e comparação com o ano de 2016.

É possível verificar que ao longo do ano de 2016 o regime de chuvas se assemelhou bastante ao ano médio calculado. Destacando-se os meses de janeiro e setembro, onde foram verificadas precipitações da ordem de 309 e 149 mm, respectivamente. Esses valores são 74 e 243%, respectivamente, superiores aos meses de janeiro e setembro da NC. Dessa foram quando se calcula o extrato do balanço hídrico, tanto na área do gotejamento quanto na área do pivô central, verifica-se que há déficit de balanço somente nos meses que antecede e procede o período de inverno (Figura 37 e Figura 38).



Figura 37. Extrato do balanço hídrico para a área de gotejamento ao longo de todo o ano de 2016.



Figura 38. Extrato do balanço hídrico para a área de pivô central ao longo de todo o ano de 2016.

Verificou-se que no período de condução da Etapa II que os índices pluviométricos foram muito bons, pois considerando um período de 360 dias, foram registrados um total de 1592,5 mm de chuva (), acima da média anual, considerando o mesmo período que é de 1382,4 mm.





## 4.2.2 Características biométricas das plantas

A análise de variância com os valores de F realizada nos dados médios de altura, diâmetro de copa e volume de copa e Índice de Área Foliar (IAF) obtidos das avaliações das plantas são apresentadas na Tabela 12. Para todas as variáveis analisadas houve o efeito significativo da irrigação, dos tipos de poda e da época de avaliação após a poda (DAP) porém não houve influência da irrigação (I) (Tabela 7).

**Tabela 12.** Valores de F para efeito da irrigação (I), poda (P) e dias de avaliação após a poda (DAP) na altura de plantas, diâmetro da copa, volume de copa e índice de área foliar (IAF) durante condução da Etapa II

|  | Fonte de    | GL | Altura             | Diâmetro           | Volume de copa     | IAF                  |
|--|-------------|----|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
|  | Variação    |    | (cm)               | (cm)               | (cm) .             |                      |
|  | I           | 1  | 2,03 <sup>ns</sup> | 3,73 <sup>ns</sup> | 1,04 <sup>ns</sup> | 1,36 <sup>ns</sup>   |
|  | Р           | 2  | 11,75***           | 25,66**            | 38,23***           | 3,81 <sup>*</sup>    |
|  | DAP         | 6  | 83,97***           | 66,86***           | 83,88***           | 41,89 <sup>***</sup> |
|  | I x P       | 2  | 1,16 <sup>ns</sup> | 0,38 <sup>ns</sup> | 1,55 <sup>ns</sup> | 1,41 <sup>ns</sup>   |
|  | I x DAP     | 6  | 0,92 <sup>ns</sup> | 3,85 <sup>*</sup>  | 3,74**             | 2,15 <sup>ns</sup>   |
|  | DAP x P     | 12 | 15,23***           | 5,45***            | 12,64***           | 3,89***              |
|  | I x P x DAP | 12 | 1,05 <sup>ns</sup> | 1,61 <sup>ns</sup> | 1,95 <sup>ns</sup> | 2,11 <sup>*</sup>    |
|  | Média geral |    | 302,03             | 277,36             | 15,77              | 2,85                 |
|  | CV (%)      |    | 13,08              | 16,14              | 22,88              | 11,12                |

O aumento nas alturas das plantas ocorreu de forma diferenciada entre os tipos de poda, tendo sido verificados incrementos de 66, 162,5 e 111 cm em P1, P2 e P3 respectivamente, representando acréscimos de 29,7, 95,1 e 51% em relação

às alturas no início do experimento. O diâmetro da copa seguiu a mesma tendência observada para altura com acréscimos de 77,8, 127,8 e 125,2% em P1, P2 e P3, respectivamente, em relação as médias no início do estudo.

Os acréscimos em altura e diâmetro da copa ao longo do tempo podem ser relacionados com o fato do pinhão-manso ser uma planta de crescimento rápido, cuja altura média é de dois a três metros, podendo chegar a cinco metros em condições especiais de clima, solo e irrigação (Openshaw, 2000). De acordo (Albuquerque *et al.*, 2009), ao analisar o crescimento do pinhão-manso em condições de sequeiro no semiárido nordestino, verificaram um rápido crescimento da cultura no período chuvoso. Plantas submetidas à poda drástica apresentaram maior crescimento vegetativo quando esta é feita no inverno, conforme observaram (Scarpare Filho *et al.*, 2011) (Rufato *et al.*, 2012), corroborando o comportamento observado neste trabalho.

Com relação ao tipo de manejo hídrico adotado, não houve diferença estatística entre os tratamentos, resultado este contrário ao verificado por (Oliveira *et al.*, 2012), que concluíram que o pinhão-manso é exigente em água e quando suprido suas necessidades hídricas o mesmo pode apresentar crescimento diferenciado quando comparado a lavouras sem um manejo hídrico adequado. Esta afirmativa também é confirmada por (Behera *et al.*, 2010), segundo o autor o crescimento e desenvolvimento do pinhão é aumentado quando o mesmo é submetido a lâminas frequentes de irrigação.

No presente estudo observou-se no tratamento sem poda altura média de 2,88 m, observando valores médios de 3,12 e 3,03 m, considerando o tratamento sem poda, para as áreas de irrigação com pivô central e gotejamento, respectivamente. Nas avaliações para diâmetro médio de copa obteve-se valores de 277,36 cm, assemelhando-se com os resultados apresentados por (Muller *et al.*, 2014) e superiores aos resultados de (Torres *et al.*, 2011).

A variação do IAF entre as podas seguiu a mesma tendência ao longo dos dias após a poda, com médias que variaram de 0,78 a 2,7 em P1; 0,5 a 3,3 em P2; e 0,3 a 3,3 em P3, sendo que os valores máximos foram verificados aos 260 DAP. De forma geral, os maiores índices de área foliar foram verificados entre os 150 e 120 DAP, sendo que o tratamento P2 apresentou a maior média (1,8) em relação aos demais tratamentos. Esse comportamento pode ser consequência das maiores taxas pluviométricas observadas nesse período, principalmente nos meses de

dezembro de 2015 (90 DAP) e janeiro de 2016 (120 DAP). Assim, os valores de IAF seguiram a mesma tendência já relatada para as taxas de crescimento, ou seja, com o crescimento vegetativo, houve também aumento na área foliar.

### 4.2.3 Condutância estomática

Da mesma forma como foi avaliada na Etapa I, a condutância estomática foi avaliada na Etapa II, ou seja, particionando a planta em folhas da base, folhas do terço médio superior.

Na Figura 40 está apresentado os valores de condutância estomática obtidos nos tratamentos de poda 1 (Figura 40A), poda 2 (Figura 40B) e poda 3 (Figura 40C) dentro da área irrigada por gotejamento. As linhas do gráfico representam a condutância de folhas da base, terço médio e folhas novas, bem como a radiação solar verificada no dia juliano 100 do ano de 2016.



**Figura 40.** Condutância estomática (mmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) e radiação solar global (W m<sup>-2</sup>) avaliadas em folhas da base, do terço médio superior e de folhas novas, no tratamento irrigado por gotejamento para o dia juliano 100 de 2016, considerando a poda 1 (A), poda 2 (B) e poda 3 (C).

Pode-se verificar que independentemente do tipo de poda, a condutância estomática apresentou maiores valores nas folhas novas, com os menores valores obtidos nas folhas do terço médio. As folhas novas, por se encontrarem, em sua maioria em contato direto com a atmosfera, possuem uma maior quantidade de água em potencial que pode fluir para a atmosfera através da superfície da folha. As

folhas do terço médio se encontram em uma região de menor turbulência com a atmosfera e esse potencial de perda de água é menor.

Os maiores valores de condutância estomática na área irrigada por gotejamento foram observados no tratamento de poda 2, com valores máximos de 863 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Na Figura 40 é possível verificar um acompanhamento da condutância estomática com a radiação solar, ao passo que a radiação aumenta, a condutância estomática também aumenta.

No período noturno a condutância estomática era considerada zero ou próxima de zero, ou seja, a atividade da planta era interrompida, caracterizado pelo fechando os estômatos das folhas. Conforme ocorria as primeiras horas de luz no dia (por volta das 7:00h), a planta iniciava o processo de abertura dos estômatos que, consequentemente, foi observado um acréscimo nos valores de condutância estomática. Das 12:00h às 14:00h, momento de maior valor de radiação global, também foram verificados os maiores valores de condutância estomática. Assim que o sol foi se ponto e a radiação foi diminuindo (a partir das 18:00h), a condutância estomática também diminuiu, permitindo afirmar que a incidência luminosa tem papel fundamental na atividade transpiratória das plantas ao longo do dia.

Na Figura 41 está apresentado os valores de condutância estomática obtidos nos tratamentos de poda 1 (Figura 41A), poda 2 (Figura 41B) e poda 3 (Figura 41C) dentro da área irrigada por pivô central. As linhas do gráfico representam a condutância de folhas da base, terço médio e folhas novas, bem como a radiação solar verificada no dia juliano 100 do ano de 2016.

Da mesma maneira como verificado na área de gotejamento, o tratamento de poda 2 apresentou os maiores valores de condutância estomática, com valor máximo de 929,2 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Nesta área as folhas novas apresentaram os maiores valores de condutância estomática, assim como ocorreu na área com gotejamento.



**Figura 41.** Condutância estomática (mmol m-2 s-1) e radiação solar global (W m-2) avaliadas em folhas da base, do terço médio superior e de folhas novas, no tratamento irrigado por pivô central para o dia juliano 100 de 2016, considerando a poda 1 (A), poda 2 (B) e poda 3 (C).

Os valores de condutância estomática nas áreas irrigadas (gotejamento e pivô central) foram superiores quando comparados aos obtidos na área sem irrigação (Figura 42). Nas áreas irrigadas o solo foi mantido sempre próximo à capacidade de campo, por meio de irrigações frequentes, ao passo que na área sem irrigação a disponibilidade de água era apenas via precipitação. O último evento de

precipitação registrado, anterior ao dia juliano 100, ocorreu no dia juliano 82, sendo verificada uma precipitação de 7,2 mm. Precipitação significativa havia ocorrido no dia juliano 75, com valor de 37,6 mm. Portanto, o solo da área sem irrigação apresentou um teor de umidade menor quando comparado ao solo das áreas irrigadas por pivô central e gotejamento.

Na Figura 42 está apresentado os valores de condutância estomática obtidos nos tratamentos de poda 1 (Figura 42A), poda 2 (Figura 42B) e poda 3 (Figura 42C) dentro da área sem irrigação. As linhas do gráfico representam a condutância de folhas da base, terço médio e folhas novas, bem como a radiação solar verificada no dia juliano 100 do ano de 2016.

Os maiores valores de condutância estomática foram, novamente verificados no tratamento de poda 2, com valor máximo registrado de 506,2 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, sendo esse valor registrado na folha da base. Tendo o solo um teor de umidade baixo, foi verificado uma diminuição na condutância estomática com o aumento da radiação solar global, principalmente na leitura realizada por volta de13:00h. Acredita-se que esta queda pode ser atribuída ao aumento do DPV, que atingiu valores em torno de 4,89 a 5,15 kPa, neste dia (XXX).



**Figura 42.** Condutância estomática (mmol m-2 s-1) e radiação solar global (W m-2) avaliadas em folhas da base, do terço médio superior e de folhas novas, no tratamento sem irrigação para o dia juliano 100 de 2016, considerando a poda 1 (A), poda 2 (B) e poda 3 (C).

Apesar da transpiração foliar ser diretamente influenciada pela variação da radiação em um dia, fatores como época do ano e disponibilidade hídrica também exercem papel fundamental na dinâmica de transpiração das folhas do pinhãomanso em diversos momentos do ano (OPENSHAW, 2000). A associação de fatores como, por exemplo, as plantas estarem sob condições hídricas e nutricionais adequadas, livres de pragas e doenças e encontram-se nos estádios de desenvolvimento entre vegetativo e produtivo (entre setembro de um ano até maio do ano seguinte) certamente favoreceram à maior atividade transpiratória das plantas. A condutância estomática certamente seria diferente caso um desses fatores estivessem causando estresse às plantas.

### 4.2.4 Armazenamento da água no solo

As determinações do armazenamento de água no solo dos tratamentos de irrigação foram realizadas pela leitura dos lisímetros de pesagem, sendo este gerado pela média dos dois lisímetros para cada tratamento. Na Figura 43 pode ser observada a variação do armazenamento da água no solo dos lisímetros ao longo da condução da Etapa II.



Figura 43. Armazenamento de água no solo nos lisímetros dos tratamentos de irrigação por gotejamento, pivô central e sem irrigação durante o período de avaliação da Etapa II.

No início do período considerado, o armazenamento de água nas três áreas apresentava pequenas diferenças. Neste período não ocorria a irrigação por gotejamento e pivô central, uma vez que as plantas se encontravam sem folhas, devido característica do pinhão-manso. Pode verificar que as linhas de umidade nos lisímetros apresentadas na Figura 43 seguiam o mesmo padrão. Após o início do período vegetativo do pinhão-manso, as irrigações foram retomadas, ao passo que nas áreas de gotejamento e pivô central as entradas de água ocorriam por chuvas e irrigações, sendo que na área sem irrigação a entrada de água era apenas pela chuva.

No início do terceiro (período que antecede os tratamentos de poda) e do quarto ano (período dos tratamentos de poda) de cultivo do pinhão-manso foi observado uma diferença na forma com que as plantas se desenvolveram. O armazenamento de água no solo para as plantas no início do terceiro ano estava próximo da capacidade de campo, fazendo com que plantas iniciassem o novo ciclo vegetativo sem nenhuma restrição. Por outro lado, no início do quarto ano foi observado uma escassez de água às plantas, sendo que essas tiveram seu desenvolvimento afetado, acarretando no atraso na formação de novos ramos e folhas das plantas.

Apesar dos problemas de execução a respeito da reposição de água nos tratamentos irrigados, o que comprometeu as determinações de ET e Kc em determinados momentos, os resultados indicam que a planta de pinhão-manso tem um comportamento que permite afirmar que seu desenvolvimento não é afetado até um certo nível de déficit hídrico. O déficit hídrico não causará estresse as plantas durante o período de senescência foliar, pois as plantas encontram-se completamente sem folha e não são capazes de utilizar água mesmo quando essa é disponibilizada por irrigação ou precipitação. É sabido também que o déficit hídrico pode causar estresse as plantas e que irá influenciar na capacidade da mesma em evapotranspirar. Entretanto, acredita-se a tolerância do pinhão-manso ao déficit hídricos em que outras culturas certamente não sobreviveriam.

Apesar do pinhão-manso ser considerado tolerante ao estresse hídrico, acredita-se que a reposição de água de maneira adequada seria importantíssima para que a planta pudesse expressar, principalmente, em aumento na produtividade. A falta d'água durante alguns períodos do terceiro e quarto ano do pinhão-manso, associado aos dados de ET, Kc, desenvolvimento biométrico (altura das plantas, diâmetro da copa e IAF) e produtividade serão fundamentais para identificar quando o estresse hídrico teve influência no desenvolvimento das plantas e também se esse estresse causou perdas na capacidade produtiva do pinhão-manso.

#### 4.2.5 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo

Calculou-se a evapotranspiração de cultura (ETc) em escala diária para o período de condução da Etapa II, iniciando em outubro de 2015 e finalizando em outubro de 2016. Os valores de ETc para os tratamentos de irrigação por gotejamento, pivô central e sem irrigação são apresentados nas Figura 44,Figura 45Figura 46.

Os valores de evapotranspiração de referência (ETo) foram calculados com auxílio do programa REF-ET (Allen, 2000) e acumulados para o total diário. Para isso foram utilizados os dados obtidos na estação meteorológica automática da Fazenda Areão (ESALQ/USP) e a estimativa foi realizada pelo método Penman-Monteith, conforme a padronização disposta em (Asce, 2005).



**Figura 44.** Evapotranspiração da cultura e evapotranspiração de referência, ambas em mm dia-1, considerando o tratamento com irrigação localizada durante o período de avaliação da Etapa II.



**Figura 45.** Evapotranspiração da cultura e evapotranspiração de referência, ambas em mm dia-1, considerando o tratamento com irrigação por pivô central durante o período de avaliação da Etapa



× Eto\_P-M (mm) • Etc\_Sem Irrigação (mm)

**Figura 46.** Evapotranspiração da cultura e evapotranspiração de referência, ambas em mm dia-1, considerando o tratamento sem irrigação durante o período de avaliação da Etapa II.

A ETc máxima calculada para os tratamentos no período foram de 6,96; 7,54 e 6,57 mm dia<sup>-1</sup> para os tratamentos de irrigação localizada, pivô central e sem irrigação, respectivamente. Vale ressaltar que o pinhão-manso é uma planta caducifólia, ou seja, ocorre a queda das folhas no inverno, com recuperação das mesmas a partir do mês de setembro. Durante essa fase a evapotranspiração da cultura é praticamente governada pela evaporação do solo. Observando atentamente as Figura 44, Figura 45 Figura 46 percebe-se uma diminuição da ETc, em todos os tratamentos de irrigação, a partir do dia 180 após o início da Etapa, que se caracteriza pelo início da senescência foliar do pinhão-manso. Após as plantas começarem a formar novos ramos e folhas (período vegetativo), os valores atingiram um patamar variando entre 4 mm dia<sup>-1</sup> até aproximadamente 8 mm dia<sup>-1</sup>.

Os valores de ETc verificados no tratamento irrigado por pivô central apresentou maiores valores em comparação ao tratamento irrigado por gotejamento, o que é facilmente explicado pela forma de reposição de água às plantas. O sistema pivô central aplica água em toda a superfície do solo, ao passo que na irrigação por gotejamento a aplicação é localizada, resultando em uma faixa molhada nas linhas de plantio. Esta aplicação de água diferenciada proporciona um aumento das taxas de evaporação da água logo após o evento de irrigação, sendo esta evaporação mais acentuada e sistemas como o pivô central.

Os valores de coeficiente de cultivo (kc) médio para o tratamento com gotejamento foi de 0,67 e para o tratamento com pivô central foi de 0,75 (Figura 47). Verifica-se que os valores de coeficiente de cultivo do pivô central foram ligeiramente maiores quando comparados com a área irrigada por gotejamento.

A determinação de Kc de cultivos deve ser realizada sempre em condições em que as plantas não estejam sofrendo qualquer tipo de restrição no seu desenvolvimento, seja ela hídrico ou nutricional (Allen *et al.*, 1998). Com um bom regime de chuvas e controle eficaz de irrigação, as plantas não encontraram problemas com relação à sua demanda hídrica, fazendo com que tanto as plantas da área irrigada com gotejamento quanto as plantas da área irrigada por pivô central absorvessem o máximo de água necessária à suas exigências metabólicas.



Figura 47. Coeficiente de cultivo (Kc, adimensional) do tratamentos irrigados por gotejamento e pivô central durante o período de avaliação da Etapa II.

(Sutterer, 2010) encontrou valores de ET de 1,9 mm dia<sup>-1</sup> nos períodos inicial e final e 5,5 mm dia<sup>-1</sup> no período médio utilizando valores de Kc adaptados conforme dados encontrados na literatura. Os valores de Kc encontrados foram de 0,6, 1,2 e 0,4 para os estádios inicial (vegetativo), médio (reprodutivo) e final (senescência), respectivamente.

## 4.2.6 Transpiração das plantas de pinhão-manso

Nas Figuras 41, 42 e 43 é apresentado o curso do fluxo de seiva estimado pela sonda de dissipação térmica e a radiação solar global ao longo ao longo dos dias julianos 33 a 37, 108 a 112 e 212 a 215 do ano de 2016, nos diferentes tratamentos de poda adotados.



**Figura 48.** Transpiração estimada pela sonda de dissipação térmica e radiação solar global ao longo dos dias Julianos 33, 34, 35, 36 e 37 do ano de 2016 nos tratamentos de poda P1 (A), P3 (B) e P2(C).



**Figura 49.** Transpiração estimada pela sonda de dissipação térmica e radiação solar global ao longo dos dias Julianos 108, 109, 110, 111 e 112 do ano de 2016 nos tratamentos de poda P1 (A), P3 (B) e P2(C).



**Figura 50.** Transpiração estimada pela sonda de dissipação térmica e radiação solar global ao longo dos dias Julianos 212, 213, 214 e 215 do ano de 2016 nos tratamentos de poda P1 (A), P3 (B) e P2(C).

Nota-se que a transpiração apresenta uma variabilidade entre os tratamentos de poda, sendo maior para as plantas com o tratamento de poda 2 (poda de 1,5 m de altura por 1,5 m de largura).

O tratamento de poda P2 foi o que apresentou maior área foliar, este fato explica uma maior transpiração por parte das plantas deste tratamento, pois há uma maior superfície evaporante da planta voltada para atmosfera. Aliada à área foliar, a poda aumenta a turbulência da folha com a atmosfera, promovendo uma diminuição da camada limítrofe e consequente aumento na perda de água.

(Gush, 2008) estudou a transpiração de plantas de pinhão-manso 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<sup>-1</sup> para plantas jovens e 4.460 L pl<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> 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 L dia<sup>-1</sup> (2,4 mm dia<sup>-1</sup>), enquanto que a média diária ao longo do ano foi de, aproximadamente, 5,3 L dia<sup>-1</sup> (0,4 mm dia<sup>-1</sup>). Para plantas maduras, esses valores foram 79,6 e 12,3 L dia<sup>-1</sup> (5,9 e 0,9 mm dia<sup>-1</sup>), respectivamente.

Na Figura 51, o valor máximo do fluxo de seiva foi alcançado quando o déficit de pressão de vapor atingiu 1,47 kPa. Apesar da máxima transpiração não ter sido verificada com o máximo DPV, percebe-se uma característica de proporcionalidade direta entre as curvas, ou seja, à medida que o DPV aumenta ocorre um aumento na transpiração das plantas, sendo a transpiração diminuída

com a diminuição do DPV. Sendo a planta de pinhão manso bastante resistente à seca, possivelmente, com boa disponibilidade de água no solo, a mesma continua com os estômatos abertos, mesmo nos períodos mais quentes do dia.



Figura 51. Comportamento diário da transpiração e DPV (dia juliano 121, ano de 2016) da planta de pinhão manso.

Os valores de fluxo de seiva ao longo do dia em função do DPV podem ser observados na Figura 52, por meio das setas.



Figura 52. Relação entre transpiração e DPV durante o dia juliano 321 para a planta de pinhão manso.

Analisando a Figura 52 percebe-se que a transpiração após a ascensão se normaliza e posteriormente decresce, sendo possível verificar uma tendência de histerese na curva. Possivelmente com a avaliação sendo feita para todo o dia, a curva se fecharia. Verificou-se valor máximo de transpiração de 2,5 L h<sup>-1</sup> ocorrendo ao meio dia com DPV de 1,47 kPa e valor mínimo de transpiração de 1,3 L h<sup>-1</sup>, verificado às seis horas da manhã e DPV de 0,9 kPa.

Na Figura 46 está apresentada a variação horária do déficit de pressão de vapor (DPV), pressão parcial de vapor (ea), pressão de saturação de vapor (es) e a transpiração das plantas de pinhão-manso ao longo do dia juliano 100 do ano de 2016.

Verifica-se que a pressão parcial de vapor varia pouco durante o dia, com valores permanecendo próximos a 2,3 kPa, enquanto que a pressão de saturação de vapor, atingiu 6 kPa nas horas mais quentes do dia. O DPV acompanha a es, com valores máximos verificados de 4,1 kPa. Também se verifica que a transpiração máxima de 0,77 L h<sup>-1</sup>, ocorreu ao meio dia, logo após os valores máximos de DPV e es.



Figura 53. Variação horária do déficit de pressão de vapor (DPV), pressão parcial de vapor (ea), pressão de saturação de vapor (es) e transpiração das plantas de pinhão-manso ao longo do dia juliano 100 do ano de 2016.

# 5 CONCLUSÕES

Nas condições em que o estudo foi realizado, conclui-se que:

- O método de dissipação térmica pode ser utilizado para a determinação da transpiração de pinhão-manso.

 Foi verificado efeito significativo da irrigação, dos tipos de poda e da época de avaliação após a poda para a altura de plantas, diâmetro e volume de copa e IAF.
Com maiores valores verificados nas plantas submetidas a poda de 1,5 x 1,5 m.

- As médias de evapotranspiração do pinhão-manso foram 6,96; 7,54 e 6,57 mm dia
<sup>1</sup> para os tratamentos de irrigação localizada, pivô central e sem irrigação, respectivamente.

- Os valores de coeficiente de cultivo (kc) médio para o tratamento com gotejamento foi de 0,67 e para o tratamento com pivô central foi de 0,75.

## REFERÊNCIAS

ACHTEN, W. M. J. et al. Jatropha bio-diesel production and use. **Biomass and bioenergy,** v. 32, n. 12, p. 1063-1084, 2008. ISSN 0961-9534.

ALBUQUERQUE, W. G. et al. Avaliação do crescimento do pinhão manso em função do tempo, quando submetido a níveis de água e adubação nitrogenada. **Revista de Biologia e Ciências da Terra,** v. 9, n. 2, p. 621-629, 2009.

ALLEN, R. G. REF-ET: reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. **University of Idaho www. kimberly. uidaho.** edu/ref-et, 2000.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome,** v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ANGELLOCCI, L. R. Água na planta e trocas gasosas: introdução ao tratamento biofísico. LR Angelocci, 2002. 272.

ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R. Agrometeorologia<sup>^</sup> sfundamentose aplicacoes práticas. Guaíba, Agropecuária, 2002. 478 ISBN 8585347716.

ARRUDA, F. P. et al. Cultivo de Pinhao manso (Jatropha curcas) como alternativa para o semiárido nordestino. **Revista Brasileira de oleaginosas e fibrosas Campina Grande,** v. 8, n. 1, p. 789-799, 2004.

ASCE. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. **Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration,** v. 173, 2005.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W., Eds. **Qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, v.29, p.153, Campina Grande: UFPBed. 1999.

BEHERA, S. K. et al. Evaluation of plant performance of Jatropha curcas L. under different agro-practices for optimizing biomass–a case study. **Biomass and bioenergy**, v. 34, n. 1, p. 30-41, 2010. ISSN 0961-9534.

BOUYOUCOS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. **Agronomy journal**, v. 43, n. 9, p. 434-438, 1951. ISSN 0002-1962.

BRITTAINE, R.; LUTALADIO, N. Jatropha: a smallholder bioenergy crop. **Roma: FAO**, v. 8, p. 96p, 2010.

BURGESS, S. S. O. et al. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. **Tree Physiology**, v. 21, n. 9, p. 589-598, 2001. ISSN 0829-318X.
CABIDEL, B.; DO, F. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. **Agronomie,** v. 11, n. 8, p. 669-678, 1991. ISSN 0249-5627.

CAMPECHE, L. F. S. M. CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DE LISÍMETROS DE PESAGEM PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DA. 2002. 62 Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo

CARNIELLI, F. O combustível do futuro. **Boletim Informativo, Belo Horizonte,** v. 29, n. 1413, 2003.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada. **Viçosa: Ed. UFV**, p. 240, 2012.

EMBRAPA, S. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, p. 20, 2013.

FERREIRA, M. I.; SILVESTRE, J. C. Medição da transpiração em cobertos descontínuos: vinha em diferentes declives, na região do oeste. Congresso da Água, 2004, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos Lisboa. p.1-11.

FLUMIGNAN, D. L. Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (Jatropha curcas L.). 2012. 200 Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz

GRANIER, A. A new method of sap flow measurement in tree stems. **Annales des Sciences Forestieres,** v. 42, n. 2, 1985. ISSN 0003-4312.

GRANIER, A.; GROSS, P. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. Annales des Sciences Forestières, 1987, EDP Sciences. p.1-14.

GUSH, M. B. Measurement of water-use by Jatropha curcas L. using the heat-pulse velocity technique. **Water SA**, v. 34, n. 5, p. 1-5, 2008. ISSN 1816-7950.

HEIFFIG, L. S.; CAMARA, G. M. S. Potencial da cultura do pinhão-manso como fonte de matéria-prima para o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel. **Agronegócio de Plantas Oleaginosas: matérias-primas para biodiesel. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV**, p. 105-121, 2006.

HELLER, J. **Physic nut, Jatropha curcas L**. Bioversity international, 1996. 66 ISBN 9290432780.

JUNIOR, C. R. A. B. Desenvolvimento de mudas de pinhão manso (Jatropha curcas L.) em tubetes e submetidas a diferentes níveis de déficit hídrico. 2011.
94 Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz

JUNIOR, E. F. F. **Relações hídricas em citrus irrigado por gotejamento sob estresse hídrico contínuo e intermitente**. 2012. 93 Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo

KUMAR, A.; SHARMA, S. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (Jatropha curcas L.): a review. **Industrial crops and products,** v. 28, n. 1, p. 1-10, 2008. ISSN 0926-6690.

LAVIOLA, B. G. et al. Genetic parameters and variability in physic nut accessions during early developmental stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 45, n. 10, p. 1117-1123, 2010. ISSN 0100-204X.

LENA, B. P. Consumo hídrico do pinhão-manso (Jatropha curcas L.) irrigado e sem irrigação na fase de formação. 2013. 62 Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz

LENA, B. P. et al. Performance of LAI-2200 plant canopy analyzer on leaf area index of Jatropha nut estimation. **Journal of Agronomy**, v. 15, n. 4, p. 191-197, 2016.

LU, P.; CHACKO, E. Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees. **Agronomie,** v. 18, n. 7, p. 461-471, 1998. ISSN 0249-5627.

MULLER, M. D. et al. Desenvolvimento vegetativo de pinhão-manso em diferentes arranjos de plantio em sistemas agrossilvipastoris. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 49, n. 7, p. 506-514, 2014. ISSN 1678-3921.

OLIVEIRA, E. L. et al. Resposta do pinhão-manso à aplicação de níveis de irrigação e doses de adubação potássica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 16, n. 6, p. 593-598, 2012.

OPENSHAW, K. A review of Jatropha curcas: an oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and bioenergy,** v. 19, n. 1, p. 1-15, 2000. ISSN 0961-9534.

PAULINO, J. et al. Crescimento e qualidade de mudas de pinhão-manso produzidas em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 1, p. 37-46, 2011. ISSN 1415-4366.

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

PIMENTEL, C. A relação da planta com a água. Seropédica: Edur, p. 191, 2004.

POMPELLI, M. F. et al. Allometric models for non-destructive leaf area estimation of Jatropha curcas. **Biomass and Bioenergy**, v. 36, p. 77-85, 2012. ISSN 0961-9534. Disponível em: <

http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411005198 >.

RAIJ, B. van. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC, 2001. 285 ISBN 8585564059.

RICHARDS, L. A. Methods of mounting porous plates used in soil moisture measurements. **Agronomy Journal**, v. 41, n. 10, p. 489-490, 1954. ISSN 0002-1962.

ROJAS, J. S. D. Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação. 2003. 110 Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo

RUFATO, L. et al. Intensidade e épocas de poda verde em pereira'Abate Fetel'sobre dois porta-enxertos. **Revista Brasileira de Fruticultura. Cruz das Almas,** v. 34, n. 2, p. 475-481, 2012. ISSN 0100-2945.

SATURNINO, H. M. et al. Informe Agropecuário. **Belo Horizonte,** v. 26, n. 229, 2005.

SCARPARE FILHO, J. A.; MEDINA, R. B.; SILVA, S. R. **Poda de árvores frutíferas**. Piracicaba: USP: 2011.54.

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

SILVA, R. M. et al. Determinação das necessidades de rega em kiwi na região do entre Douro e Minho. Congresso da Água, 2004, LNEC Lisbon.

SUTTERER, N. Jatropha cultivation using treated sewage effluent. 2010. 59 University of Hohenheim

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. In: (Ed.). **Fisiologia vegetal**: Artmed, 2009. p.819.

\_\_\_\_\_. Fisiologia vegetal. 5. 2013. 820.

TEWARI, D. N. Jatropha & bio-diesel. Prabhat Prakashan, 2007. ISBN 8184300301.

TORRES, C. M. M. E. et al. Biomass and carbon stock in Jatropha curcas L. **Cerne**, v. 17, n. 3, p. 353-359, 2011. ISSN 0104-7760.

UCCC. Water Quality: Guidelines for Interpretation of Water Quality for Agriculture. Davis: University of California, 1975. 13.

VAN GENUTCHEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. ISSN 0361-5995.

VAN GENUTCHEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Citeseer, 1991. 93.

VELLAME, L. M. Relações hídricas e frutificação de plantas cítricas jovens com redução de área molhada do solo. 2010. 130 Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo

YE, M. et al. Current situation and prospects of Jatropha curcas as a multipurpose tree in China. **Agroforestry systems, Dordrecht,** v. 76, n. 2, p. 487-497, 2009. ISSN 0167-4366.