

RIAN ANTONIO DOS REIS RIBEIRO

**ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO DA MACAÚBA UTILIZANDO O  
MÉTODO DE DISSIPACÃO TÉRMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R484e  
2019  
Ribeiro, Rian Antonio dos Reis, 1995-  
Estimativa da transpiração da macaúba utilizando o método  
de dissipação térmica / Rian Antonio dos Reis Ribeiro. – Viçosa,  
MG, 2019.  
viii, 46 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 39-46.

1. Meteorologia agrícola. 2. Macaúba. 3. Fluxo da seiva.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia  
Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

RIAN ANTONIO DOS REIS RIBEIRO

**ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO DA MACAÚBA UTILIZANDO O  
MÉTODO DE DISSIPACÃO TÉRMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de Magister Scientiae.

APROVADA: 19 de fevereiro de 2019.

---

Catariny Cabral Aleman

---

José Vitor Nicacio  
(Coorientador)

---

Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro  
(Orientadora)

Dedico

Aqueles que tanto se doaram para que este sonho se realizasse, meus pais, Rosivan de Assis Ribeiro e Ana Conceição dos Reis Ribeiro.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar força e iluminar para enfrentar todos os desafios nestes anos.

Aos meus pais, Rosivan de Assis Ribeiro e Ana Conceição dos Reis Ribeiro, as minhas irmãs, Iasmin Maria Silva e Rilciane Maria dos Reis Ribeiro, e familiares por sempre me concederem amor e apoio incondicionais independentemente das dificuldades.

À minha orientadora Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro, e o co-orientador, José Vitor Nicacio, pela atenção, disponibilidade e conhecimento partilhado ao longo dessa jornada.

À Universidade Federal de Viçosa e todo o corpo de servidores que a constituem, e ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia Aplicada, pela oportunidade de qualificação e aperfeiçoamento profissional a mim concedidos.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Micrometeorologia, Bruna Lüdtkke, Gabriel Peterle, Gisele Almeida, Heitor Filpi, Sandro Moreira e Victor Benezolli pelo incentivo, suporte, paciência e momentos de descontração, essenciais para a realização deste trabalho.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, Adolpho Rocha, Hugo Thaner, José Darlon e João Victor, pela amizade construída no convívio diário e pelos auxílios ao longo desta pesquisa.

As amizades construídas ao longo da graduação na Universidade Federal Rural da Amazônia, Euzanyr Silva, Jorge Padilha, Neyla Thayná, Tayssa Menezes, Wendel Kaian e Zenóbio Júniorque, mesmo longe, contribuíram de forma ímpar para a concretização desta jornada.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos, que me possibilitou mergulhar neste desafio.

## **BIOGRAFIA**

RIAN ANTONIO DOS REIS RIBEIRO, filho de Rosivan de Assis Ribeiro e Ana Conceição dos Reis Ribeiro, nasceu em 23 de abril de 1995, na cidade de Capitão Poço, Pará. No ano de 2012 iniciou a graduação em Agronomia na Universidade Federal Rural da Amazônia campus de Capitão Poço – PA, concluindo a mesma no ano de 2017. No mesmo ano, iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Aplicada na Universidade Federal de Viçosa.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1 METODOS TÉRMICOS.....	5
2.1.1 MÉTODO DO PULSO DE CALOR.....	6
2.1.2 MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR .....	7
3 OBJETIVOS.....	11
3.1 GERAL.....	11
3.2 ESPECÍFICOS .....	11
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4.1 ÁREA EXPERIMENTAL.....	12
4.2 MEDIDA DO FLUXO DE SEIVA .....	13
4.3 CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DOS SENSORES .....	16
4.4 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS .....	22
4.5 UMIDADE NO SOLO .....	23
4.6 ANÁLISE DE DADOS .....	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	26
5.1 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO EXPERIMENTO .....	26
5.2 CURSO MÉDIO DIÁRIO DA TRANSPIRAÇÃO EM RELAÇÃO AOS FATORES METEOROLÓGICOS .....	28
5.3 VARIAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO NAS FACES NORTE E SUL DO CAULE. 32	
5.4 TENDÊNCIAS DIURNAS DA TRANSPIRAÇÃO PARA PLANTAS DE MACAÚBA SOB CONDIÇÕES DE CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E NUBLADO.....	34
5.5 RESPOSTAS DA TRANSPIRAÇÃO AOS FATORES AMBIENTAIS .....	36
6 CONCLUSÕES.....	38
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	38
8 LIMITAÇÕES .....	38
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do sensor de pulso de calor instalado no caule de uma planta (adaptado de Trcala & Cermárk, 2016).....	7
Figura 2. Diagrama esquemático do método de balanço de calor (adaptado de Kigalu, 2007).....	8
Figura 3. Esquema de medição do sensor de dissipação térmica (adaptado de Steppe et al., 2010).....	9
Figura 4. Mapa de localização da área experimental em Viçosa-MG.....	12
Figura 5. Seção transversal do caule de macaúba, (A) recém cortado e (B) após a imersão na solução, apresentando a área condutora pigmentada. ....	16
Figura 6. (A) Materiais utilizados para a construção das sondas, (B) e sondas confeccionadas.....	17
Figura 7. (A) Esquema do circuito eletrônico do regulador de tensão, (B) regulador de tensão construído. ....	20
Figura 8. Procedimento para instalação dos sensores de fluxo de seiva em plantas de macaúba. (A) processo de abertura do orifício no caule, (B) sondas inseridas no caule, (C) segmento do caule isolado com neopropeno.....	21
Figura 9. Sistema de aquisição de dados conectados aos sensores de fluxo de seiva. ....	22
Figura 10. (A) sensor de umidade do solo, (B) amostra de solo com sensor para calibração.....	24
Figura 11. Variação diária da temperatura média do ar - Ta (A), radiação solar global – Rg (B), déficit de pressão de vapor – DPV (C), umidade relativa do ar – UR (D) e velocidade do vento (E). ....	27
Figura 12. Precipitação acumulada em 24 horas (mm), umidade do solo (%) expressa em termo de média diária, umidade na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) na profundidade de 40 cm. ....	28
Figura 13. Curso horário entre a transpiração e a radiação solar (A), déficit de pressão de vapor (B) e evapotranspiração de referência (C), valores médios para o período de 17 de agosto a 03 de outubro de 2018. ....	29
Figura 14. Curso horário da transpiração na face norte e sul do caule.....	33
Figura 15. Evolução da transpiração, estimada por meio dos sensores de dissipação térmica, e radiação solar ao longo de dois dias consecutivos, para condições de céu parcialmente nublado (A) e nublado (B). ....	35
Figura 16. Relação da transpiração média diária com a radiação solar global (A), déficit de pressão de vapor (B) e evapotranspiração de referencia (C). ....	37

## RESUMO

RIBEIRO, Rian Antonio dos Reis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Estimativa da transpiração da macaúba utilizando o método de dissipação térmica.** Orientadora: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Coorientador: José Vitor Nicacio.

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmeira nativa das florestas tropicais com grande potencial agroeconômico. No entanto, existem poucas informações sobre os seus aspectos ecofisiológicos em condições de campo, especialmente em relação à transpiração que está relacionada com a produtividade da cultura. O objetivo do trabalho foi estimar a transpiração da macaúba no município de Viçosa (MG) utilizando o método de dissipação térmica. O experimento foi realizado em uma área experimental de consórcio de macaúba com café arábica (*Coffea arábica* L.), no período de 17 de agosto a 03 de outubro de 2018. Os sensores de dissipação térmica foram instalados em 5 plantas representativas da área na posição norte e sul do caule. Foram monitoradas as variáveis meteorológicas (temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e precipitação) e a umidade do solo. Com base nos dados coletados foi realizada a análise do curso médio diurno da transpiração para o período de avaliação, nas condições de céu parcialmente nublado e nublado e sua variação quanto à posição de instalação do sensor no caule. Posteriormente, foram realizadas análises de regressão ( $p < 0,05$ ) para avaliar a relação entre transpiração e o déficit de pressão de vapor (DPV), radiação solar global ( $R_g$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e umidade do solo ( $\theta$ ). Observou-se que a transpiração acompanhou a mudança diurna da radiação solar, déficit de pressão de vapor e evapotranspiração de referência, apresentando apenas uma defasagem temporal. O valor médio da transpiração da macaúba para o período de avaliação foi de  $35 \text{ L dia}^{-1}$ , em que a transpiração foi influenciada principalmente pelo déficit de pressão de vapor e pela radiação solar global. Sendo assim, o método de dissipação térmica utilizado na estimativa da transpiração mostrou-se eficaz para a macaúba.

## ABSTRACT

RIBEIRO, Rian Antonio dos Reis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Estimation of macaúba transpiration using the thermal dissipation method.** Adviser: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Co-adviser: José Vitor Nicacio.

The macaúba (*Acrocomia aculeata*) is a palm native to tropical forests with great agroeconomic potential. Despite this, there is little information on its ecophysiological aspects in field conditions, especially related to transpiration, a variable that is related to crop productivity. Thus, the objective of this work was to estimate the transpiration of the macaúba in Viçosa (MG) using the thermal dissipation method. The experiment was carried out in an experimental field of macaúba consortium with arabica coffee (*Coffea arabica* L.), from August 17 to October 3, 2018. The thermal dissipation sensors were installed in 5 plants representative of the area in the position north and south of the stem. Meteorological variables (temperature and relative humidity, solar radiation, wind speed and precipitation) and soil moisture were also measured. Based on the collected data, we analyzed the mean diurnal course of transpiration for the evaluated period in the partly cloudy and cloudy sky conditions and its variation in the position of sensor installation in the stem. Then, we performed regression analyses ( $p < 0.05$ ) to evaluate the relationship between transpiration and the vapor pressure deficit (DPV), global solar radiation ( $R_g$ ), reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) and soil moisture ( $\theta$ ). We observed that transpiration follows the diurnal change of solar radiation, vapor pressure deficit and reference evapotranspiration with a temporal lag. The mean value of macaúba transpiration was  $35 \text{ L day}^{-1}$  for the evaluation period, mainly influenced by the vapor pressure deficit and the global solar radiation. Thus, the thermal dissipation method used in the estimation of transpiration was effective for macaúba.

## 1 INTRODUÇÃO

A mudança no uso do solo ocasionada, principalmente, pela atividade antrópica, desencadeia graves consequências ao meio ambiente, dentre as quais destacam-se a redução da biodiversidade, alterações dos ciclos bioquímicos e perda de solo através de processos erosivos, dificultando, assim, o restabelecimento do equilíbrio ecológico. Nesse contexto, a cobertura vegetal é alterada principalmente para uso agrícola, incluindo a implantação de pastagens, que correspondem a aproximadamente 25% da superfície terrestre (STERLING et al., 2013).

No Brasil, o processo de ocupação do território foi incentivado por políticas públicas que priorizavam a expansão da pecuária, resultando em aproximadamente 160 milhões de hectares ocupados por pastagens (IBGE 2017). Processo semelhante ocorreu no estado de Minas Gerais, no qual essa atividade ocupa cerca de 19,1 milhões de hectares (MAPBIOMAS, 2016). Apesar da grande importância da pecuária para a economia regional, estima-se que 75% das áreas de pastagem encontram-se em estágio moderado ou fortemente degradado, o que tem ocasionado redução da produtividade e da rentabilidade dessa atividade (MAPA, 2015).

Embora as estimativas relacionadas às áreas de pastagens degradadas sejam preocupantes, essa problemática pode trazer perspectivas positivas se considerado o seu potencial de utilização para viabilizar o aumento da produtividade por meio de estratégias de recuperação (DIAS-FILHO, 2011). Porém, as principais limitações que impedem que a prática de recuperação de áreas degradadas seja amplamente utilizada pelos produtores rurais são: custo, perda de área cultivável pela ocupação da vegetação natural e, conseqüentemente, a redução dos lucros (BARBOSA, 2006). Uma alternativa viável para o produtor rural seria a utilização de espécies nativas da região que

apresentem grande potencial econômico para recuperar as áreas degradadas e diversificar a atividade na propriedade (POTT & POTT, 2002). Entre as espécies nativas da região de Minas Gerais, a macaúba (*Acrocomia aculeata*) tem se destacado.

A macaúba é uma palmeira nativa das florestas tropicais, pertencente à família *Arecaceae*, com ampla distribuição na América do Sul (NAVARRO-DÍAZ et al., 2014; CORSER et al., 2016). No Brasil, pode ser encontrada em todo território, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (CÉSAR et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2017). Além da ocorrência natural dos maciços em condições de clima e solo diversificado (MACHADO et al., 2016), a macaúba possui baixa suscetibilidade a seca (BICALHO et al., 2016), alta resistência a pragas (COSTA et al., 2014) e preferência por áreas abertas com alta irradiação solar (CÉSAR et al., 2015), atributos que devem ser considerados na escolha da espécie para projetos de recuperação de áreas degradadas.

A composição química e as características térmicas dos óleos extraídos dos frutos da macaúba são semelhantes ao do óleo vegetal mais consumido no mundo, o da palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq) (PIRES et al., 2013). Segundo RÍO et al. (2016), os óleos extraídos da polpa e da amêndoa do fruto da macaúba são matérias-primas promissoras para a obtenção de compostos com importância econômica para as indústrias de alimento, cosmético, farmacêutica e de biodiesel.

A vantagem da macaúba sobre a palma de óleo é a sua adaptabilidade nas regiões com precipitações pluviométricas entre 1.300 a 1.700 mm ano<sup>-1</sup>, como a zona tropical da América Latina (MOTOIKE & KUKI, 2009), enquanto que o cultivo da palma de óleo é restrito às zonas equatoriais, devido à necessidade de ocorrência bem distribuída de chuvas variando entre 1.700 a 3.600 mm ano<sup>-1</sup> (CORLEY & TINKER, 2007). Outra vantagem da macaúba em relação às demais oleaginosas (soja, milho,

entre outras) é que essa espécie não é tradicionalmente utilizada como fonte de alimento e, portanto, seu óleo também pode ser destinado à produção de biocombustíveis sem interferir na balança comercial dos alimentos (CÉSAR et al., 2015).

O processamento dos frutos da macaúba gera uma ampla variedade de coprodutos com grande valor econômico, a exemplo dos farelos da polpa (mesocarpo) e da amêndoa (semente), que podem ser utilizados para alimentação humana e animal, e o endocarpo, empregado na fabricação de carvão vegetal (RUBIO NETO et al., 2012; PIRES et al., 2013). Essa diversidade de coprodutos torna a cadeia produtiva da macaúba viável e sustentável (CASTRO et al., 2017).

A fim de atender à demanda por fontes de energia renováveis e o crescente interesse pelo cultivo da macaúba, no ano de 2011, o estado de Minas Gerais aprovou a lei N°19.485, de 13 de janeiro, intitulada Pró-Macaúba, passando a incentivar o cultivo, extração, comercialização, consumo e a transformação da cadeia produtiva da macaúba e das demais palmeiras oleaginosas no Estado. Com esta lei, o estado de Minas Gerais destaca-se como uma região bastante promissora ao cultivo da macaúba, gerando forte interesse dos agricultores e investidores nessa região. No entanto, apesar do considerável potencial agroeconômico dessa cultura, há poucas informações sobre os seus aspectos ecofisiológicos em condições de campo.

A caracterização ecofisiológica das plantas de macaúba representa um dos requisitos para entender como a espécie interage com o ambiente (PIRES et al., 2013). Entre as variáveis ecofisiológicas estudadas, a transpiração merece destaque, pois está associada à taxa de assimilação de carbono e, portanto, à produtividade da cultura. Além disso, o conhecimento sobre o fluxo de vapor de água (transpiração) em ecossistemas constitui um conjunto de informações que podem ser utilizadas como parâmetros de modelos agrometeorológicos (ZHU et al., 2013).

Existem diversas metodologias empregadas para determinar a transpiração, o método considerado padrão baseia-se na utilização de lisímetros (PAYERO & IRMAK, 2008). Entretanto existem numerosas limitações que restringem seu uso, incluindo o complexo trabalho de construção e instalação, custos elevados e operações de manutenção complexa (RUIZ-PENALVER et al., 2015), tornando muita das vezes inviável a sua utilização, principalmente, para plantas de grande porte.

Com os avanços tecnológicos obtidos nas últimas décadas e as limitações dos métodos tradicionais de estimativa da transpiração, o uso de sensores para medir o fluxo de seiva tem se tornado um método amplamente empregado para estudar a transpiração à nível de planta e o consumo hídrico dos ecossistemas. O fluxo de seiva refere-se ao movimento de água e sais minerais através de um segmento do caule em um determinado período, sendo indicador importante para refletir o movimento de água nas plantas (LIU et al., 2012). Em geral, o fluxo de seiva possui uma relação linear com a transpiração e pode ser usado para calcular a transpiração das árvores, considerando que aproximadamente 99% da água transportada pelo tecido condutor do caule é perdida pela planta durante o processo de transpiração (BETHENOD et al., 2000). Os métodos de fluxo de seiva usam o calor como um marcador para o movimento da seiva, por isso são denominados métodos térmicos (VANDEGEHUCTE & STEPPE, 2012).

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 METODOS TÉRMICOS**

Os métodos térmicos permitem estimar a transpiração através da mensuração do fluxo de seiva dos vegetais por meio da utilização de sensores. Esses equipamentos irradiam calor em uma porção do tecido condutor de água (xilema), normalmente em um segmento do caule da planta, e analisam o efeito ocasionado pelo fluxo de seiva na temperatura do sensor ao longo do tempo (OISHIA et al., 2016), possibilitando o seu acompanhamento em uma escala temporal de curtos intervalos.

Os sensores de fluxo de seiva são ferramentas para estudar a ecofisiologia das plantas e a regulação da transpiração associada à disponibilidade de água e nutrientes, incidência de doenças e práticas de manejo (CHEN et al., 2014). É a técnica mais eficaz para estimar a transpiração *in situ*, uma vez que permite acompanhar o funcionamento hídrico das plantas sem alterar as condições fisiológicas e microclimáticas por períodos prolongados (PINTO JR et al., 2013; OISHIA et al., 2016). Além disso, esses métodos são relativamente baratos, facilmente automatizados e com alto grau de precisão (ALMEIDA et al., 2016).

Os métodos térmicos podem ser divididos em três grupos, de acordo com o método de aquecimento e detecção de sinal: método de pulso de calor, que tem por objetivo verificar a velocidade de deslocamento de um curto pulso de calor (HUBER, 1932; HUBER & SCHMIDT, 1937; MARSHALL, 1958); balanço de calor destinado a mensurar a transferência de calor convectivo ocasionado pelo movimento ascendente da seiva (SAKURATAMI, 1981) e dissipação térmica, que mede o transporte de calor provocado pelo fluxo de seiva (GRANIER, 1985).

### **2.1.1 MÉTODO DO PULSO DE CALOR**

O método do pulso de calor foi proposto inicialmente por Huber (1932) para avaliar o fluxo de seiva em Lianas tropicais e, posteriormente, foi adaptado por Huber e Schmidt (1937) quanto ao posicionamento dos sensores, a fim de se obter resultados mais precisos. Contudo, apenas em 1958, Marshall demonstrou analiticamente a relação entre a velocidade do pulso de calor com o fluxo de seiva.

A técnica em questão consiste na aplicação intermitente de calor no tecido condutor de água da planta, seguido do monitoramento da temperatura da seiva a jusante e a montante do dispositivo de aquecimento (CLEARWATER et al., 2009). Esse método baseia-se nas medidas do intervalo de tempo entre a introdução do pulso de calor e sua recepção pelos sensores de temperatura (ER-RAKI et al., 2013). O tempo gasto para o pulso de calor mover essa distância é usado para calcular a velocidade do mesmo (MADURAPPERUMA et al., 2009). Dessa forma, o fluxo de seiva é mensurado pela determinação da velocidade de um curto pulso de calor.

Os sensores (Figura 1), geralmente, são constituídos de uma sonda de aquecimento, encarregada pela liberação do pulso de calor, e duas sondas de temperatura, uma a montante e outra a jusante da fonte de aquecimento, responsáveis pela recepção do calor, sendo o fluxo de seiva medido indiretamente a partir da velocidade de deslocamento do pulso de calor, que é transportado por condução através do tecido vegetal e por convecção pelo movimento da seiva (STEPPE et al., 2010).

As medições da velocidade do pulso de calor são apropriadas para determinar a transpiração em floresta e cultivos agrícolas, pois os sensores podem ser aplicados em qualquer haste lenhosa maior que 40 cm de diâmetro, possuem baixo custo, fácil instalação e automação (GREEN et al., 2003). No entanto, a principal limitação deste método é a mensuração de baixos fluxos de seiva, além da necessidade de conhecimento

das propriedades térmicas do tecido condutor e da seção de transporte de água da planta (NAKAI et al., 2005; MINER et al., 2017).

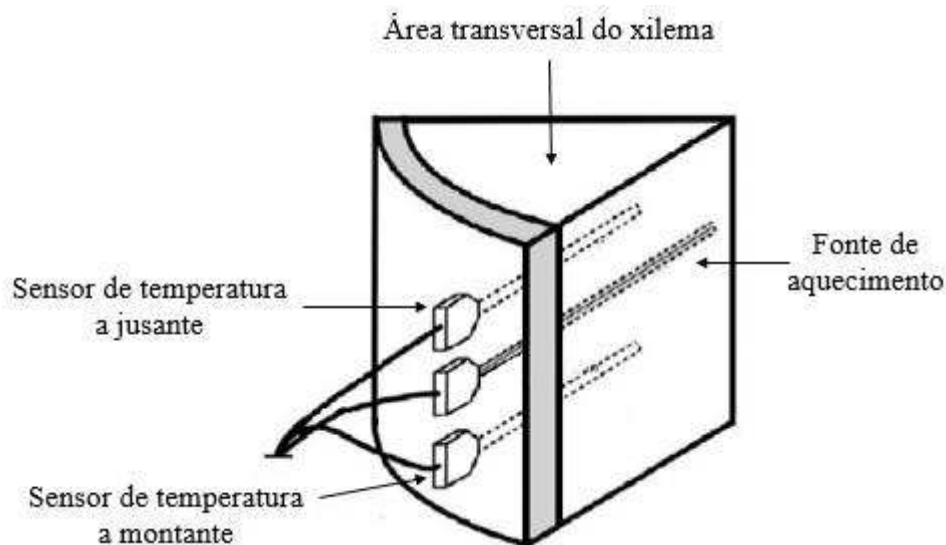


Figura 1. Esquema do sensor de pulso de calor instalado no caule de uma planta(adaptado de Trcala & Cermák, 2016).

## 2.1.2 MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR

O método de balanço de calor foi inicialmente desenvolvido por Cermak et al. (1973), o qual consistia na irradiação de calor de forma variável, com o intuito de manter estável o gradiente de temperatura no tronco. Uma abordagem mais simplificada foi proposta por Sakuratani (1981), em que o autor empregou um sistema de aquecimento contínuo, que dispensa a utilização de aparelhagem eletrônica sofisticada, sendo a abordagem mais utilizada atualmente.

Essa técnica tem por princípio o balanço de energia em um segmento do caule ou ramo, de forma simplificada envolve a aplicação de um fluxo constante de calor nessas estruturas e a mensuração da energia térmica dissipada no sentido axial ( $Q_i$  e  $Q_s$ ) e radial ( $Q_r$ ) do tecido vegetal, do calor armazenado ( $Q_a$ ) no segmento amostrado e da energia térmica dissipada de forma convectiva através do fluxo de seiva ( $Q_f$ )(ALMEIDA et al., 2016).

Para realizar o balanço de energia, torna-se necessária a utilização de sondas. Esses equipamentos possuem, de maneira geral, uma manta térmica de aquecimento, que envolve o tecido vegetal e é responsável pela aplicação de calor, e sensores de fluxo de calor e de temperatura, para se obter os valores de gradiente térmicos ( $dT$ ) em diferentes pontos do segmento analisado (KIGALU, 2007), conforme ilustrado na figura 2.

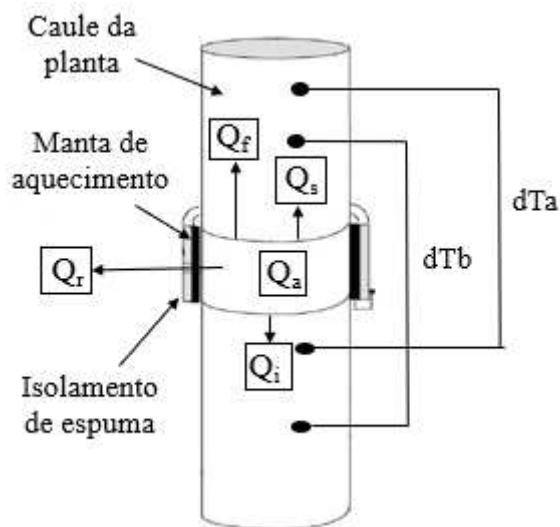


Figura 2. Diagrama esquemático do método de balanço de calor (adaptado de Kigalu, 2007).

Essa metodologia se destaca dos outros métodos de fluxo de seiva por ser a mais direta e não requerer o conhecimento da área da seção transversal do xilema (MARIN et al., 2008). Infelizmente, é a mais difícil de ser implementada, devido à complexidade do equipamento e à restrição a ser utilizada em estrutura da planta com diâmetro inferior a 50 cm, em decorrência da necessidade de aquecimento uniforme do tecido vegetal avaliado para se obter resultados válidos, impossibilitando seu uso em plantas de grande porte (GRIME et al., 1995).

### 2.1.3 MÉTODO DE DISSIPACAO TÉRMICA

O método de dissipação térmica, descrito por Granier (1985), é um dos recursos mais empregados para estimativa da transpiração nas mais diversas culturas (HÖLLTÄ et al., 2015; FUCHS et al., 2017). Granier (1985) relacionou, de forma empírica, a velocidade de dissipação de calor, aplicado num ponto do tecido condutor de água dos vegetais com o fluxo de seiva.

Os sensores de dissipação térmica são instrumentos de baixo custo e com princípio de funcionamento relativamente simples (PINTO JR et al., 2013). Cada sensor é composto por duas sondas, que são inseridas radialmente no caule da planta (RABEL et al., 2016), figura 3. A sonda superior contém um elemento aquecedor, responsável por irradiar calor de forma contínua, e uma sonda não aquecida (sonda de referência), ambas possuem internamente um componente destinado ao monitoramento da temperatura (HOLLTA et al., 2015). Com base na diferença de temperatura entre as duas sondas, determina-se a densidade do fluxo de seiva e, conseqüentemente, a transpiração da planta.

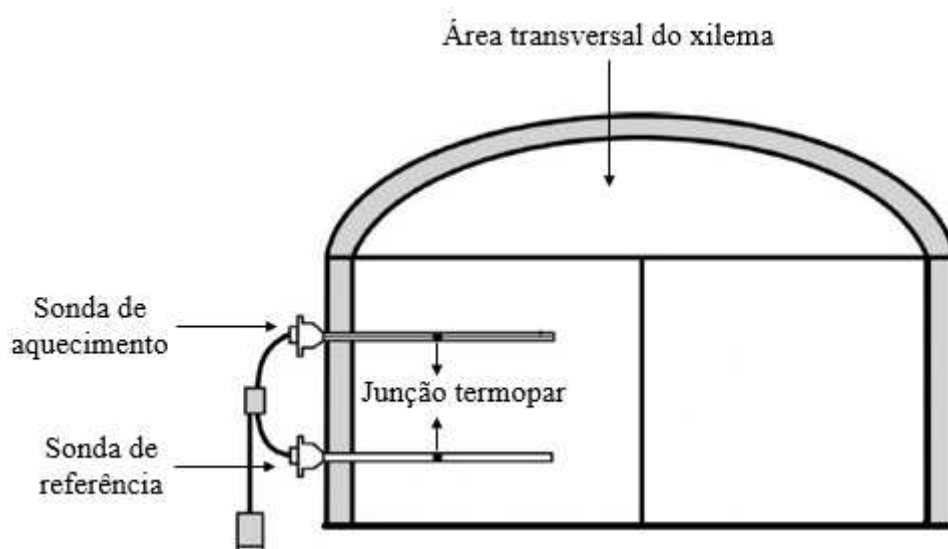


Figura3. Esquema de medição do sensor de dissipação térmica (adaptado de Steppe et al., 2010).

Apesar deste método ter sido desenvolvido originalmente para avaliar e descrever o fluxo de seiva em dicotiledôneas (NIU et al., 2017; SÉRVULO et al., 2017; HARDANTO et al., 2017), nos últimos anos, observou-se resultados promissores em pesquisa de avaliação da transpiração em plantas monocotiledôneas, como o bambu (ICHIHASHI et al., 2015; MEI et al., 2016), palma de óleo (NIU et al., 2015; MEIJIDE et al., 2017), coqueiro (ARAÚJO et al., 2012) e palmeiras nativas (RENNIGER et al., 2010; SPERLING et al., 2012).

O método de Granier (1985) apresenta a vantagem de ser relativamente menos dispendioso em comparação a outros métodos, viabilizando o aumento do número de plantas amostradas e, portanto, obter medições de transpiração mais representativas ao nível de planta (NIU et al., 2015). Além disso, permite a possibilidade de confecção do sensor e a facilidade de instalação no campo. Entretanto, assim como o método de pulso de calor, exige a determinação da área efetiva do xilema da planta, que pode vir a ser uma fonte de erro (MARINHO et al., 2013).

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 GERAL**

Estimar a transpiração da macaúba no município de Viçosa-MG utilizando o método de dissipação térmica.

#### **3.2 ESPECÍFICOS**

Construir o sensor de dissipação térmica para medir a densidade do fluxo de seiva.

Determinar o comportamento da transpiração em escala horária e diária para diferentes condições ambientais.

Analisar a influência dos elementos meteorológicos e da umidade do solo na transpiração.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado em uma área de consórcio de macaúba (*Acrocomia aculeata*) com café arábica (*Coffea arábica* L.) (20°45'24,7" S e 42°50'33,5" W, 675 m de altitude) pertencente ao departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, no município de Viçosa, Minas Gerais (Figura 4).

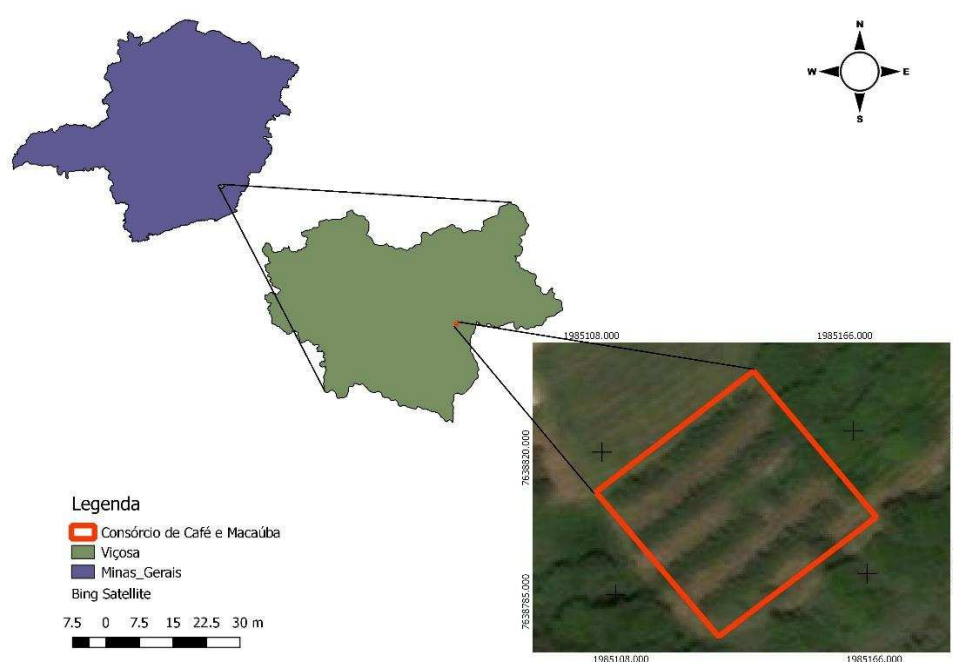


Figura 4. Mapa de localização da área experimental em Viçosa-MG.

O clima da região, conforme a classificação de Koppen, é do tipo Cwa, caracterizado pelo clima tropical de altitude, com chuvas no verão e secas no inverno (BUSATO et al., 2010). O solo local foi classificado como Argissolo vermelho amarelo distrófico, com textura argilosa. A umidade volumétrica na capacidade de campo e ponto de murcha permanente são, respectivamente, 0,44 e 0,22  $m^3m^{-3}$  e a densidade do solo é de 1,3  $Kgdm^{-3}$  para o perfil do solo de 0,4 m de profundidade (MOREIRA et al., 2018).

O consórcio foi implantado em 2007, como espaçamento das plantas de macaúbas de 11,2 m x 4,4 m, totalizando 203 palmeiras por hectare. O experimento foi realizado de 17 de agosto a 03 de outubro de 2018.

#### **4.2 MEDIDA DO FLUXO DE SEIVA**

O fluxo de seiva foi mensurado utilizando o método de dissipação térmica (GRANIER, 1987), em 5 plantas representativas da área de estudo. Essa técnica consiste no uso de sensores para mensuração da quantidade de calor dissipado pelo movimento da seiva. Cada sensor de dissipação térmica é constituído por duas sondas, uma sonda aquecida (superior) e uma sonda de referência (inferior), instaladas no tecido condutor de água da planta a uma distância vertical de, aproximadamente, 10 cm entre si.

Para o monitoramento do fluxo de seiva, foram utilizados dois sensores de dissipação térmica em cada planta, na posição norte e sul do caule, a 1,3 metros da superfície do solo, conforme as recomendações de Horna et al. (2011). Os sensores foram instalados no centro do caule da planta, devido à variação da condutividade hidráulica dessa estrutura, sendo o centro do caule o local de maior concentração de tecidos vasculares com fluxo mais estável e contínuo.

A densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) foi calculada de acordo com a metodologia desenvolvida por Granier (1987), contudo, utilizou-se parâmetros da equação específicos para palmeiras proposto por Renniger et al. (2010), de acordo com a equação 1.

$$u = 192,3 \times 10^{-6} K^{1,3} \quad \text{(Equação 1)}$$

em que:

$u$  é a densidade de fluxo seiva ( $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ); e

$K$  coeficiente de dissipação térmica, adimensional.

O coeficiente de dissipação térmica ( $K$ ) foi calculado considerando a diferença de temperatura entre as sondas, obtido pela equação 2.

$$K = \frac{\Delta T_{(0)}}{\Delta T} - 1 \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

$\Delta T_{(0)}$  é a diferença máxima de temperatura entre as duas sondas ( $^{\circ}\text{C}$ ); e

$\Delta T$  é a diferença real de temperatura entre as sondas ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Os valores de diferença máxima de temperatura entre as duas sondas ( $\Delta T_{(0)}$ ) foram determinados para cada planta por meio da média dos valores de  $\Delta T_{(0)}$  obtidos durante o período noturno de 10 dias consecutivos (LU et al., 2004; OISHI et al., 2008), com o objetivo de reduzir os erros gerados pelo armazenamento de calor e pela recarga do caule.

Para calcular o fluxo de seiva total das plantas de macaúba, e assim obter, conseqüentemente, o valor da transpiração, foi necessário realizar o produto das somas diárias da densidade de fluxo de seiva e a área condutora de água através da equação 3. Assumiu-se que a densidade do fluxo de seiva é constante para o todo o perfil do caule.

$$T = u \times A_s \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

T é a transpiração da planta ( $\text{m}^3\text{dia}^{-1}$ );

u é densidade do fluxo de seiva ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); e

As é área de condução de água ( $\text{m}^2$ ).

Como as plantas de macaúba precisavam ser preservadas para estudos futuros, a área de condução de água foi obtida a partir de uma planta do Banco Germoplasma Ativo de Macaúba pertencente à Universidade Federal de Viçosa, localizado no município de Araponga-MG. A área de condução de água foi determinada pelo método destrutivo em uma planta com idade próxima das plantas avaliadas. Retirou-se um disco do caule com espessura de, aproximadamente, 30 cm a 1,3 m da superfície do solo. Esse disco foi imerso em uma solução contendo água e corante. O corante utilizado para delimitar a área de condução de água foi o Indigo Carmine na concentração de 0,1% (GEBAUER et al., 2008). Após a coloração dos discos, estes foram fotografados e com auxílio do software de análise de imagem IMAGE J, verificou-se que praticamente toda área transversal do caule poderia ser considerada como área efetiva do xilema (Figura 5). Esse critério foi adotado para todas as plantas analisadas.

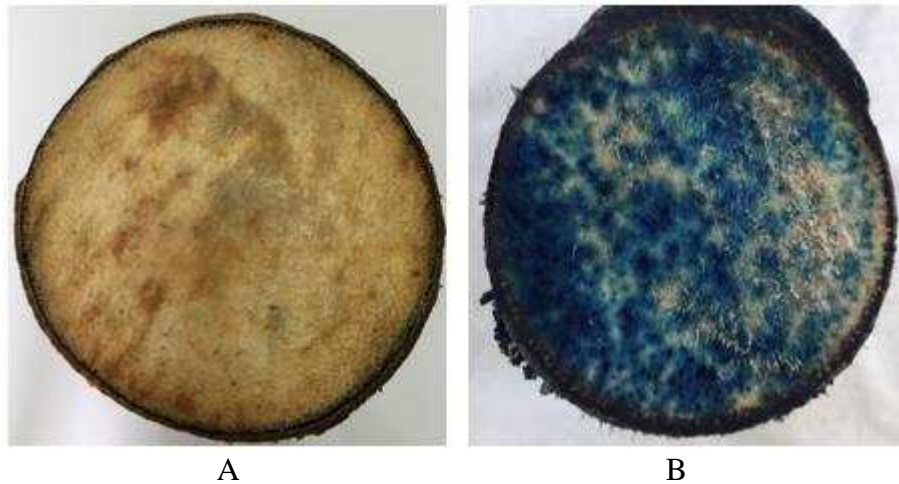


Figura 5. Seção transversal do caule de macaúba, (A) recém cortado e (B) após a imersão na solução, apresentando a área condutora pigmentada.

### 4.3 CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DOS SENSORES

Os sensores de dissipação térmica foram construídos para medir o fluxo de seiva no centro do caule da planta. Para atender esse requisito as sondas que constituem o equipamento deveriam ser longas e resistentes, obedecendo ao design desenvolvido por Sperling et al. (2012). Cada sensor era constituído por um par de sondas de 20 cm de comprimento, com 18 cm de tubo de acrílico e 2 cm de aço inoxidável, e 1 cm de diâmetro.

As sondas (figura 6) possuíam no interior da ponta de aço um resistor metal filme, elemento responsável pelo fornecimento de calor, com resistência de, aproximadamente,  $39 \Omega$  e tolerância de 1%, garantindo assim uma variação mínima durante a aplicação de calor. Para mensuração da temperatura, foram utilizados termopares (PP-T-24-SLE, Omega Engineering, Stamford, EUA) constituídos de fios de Cobre e Constantan (tipo T), com isolamento de PVC e bitola de 0,51 mm. Os fios de Cobre e Constantan foram colocados paralelamente um ao outro e suas extremidades unidas e torcidas uma ao redor da outra. Em seguida essa junção foi soldada, com a finalidade de garantir o máximo de contato entre os fios. A junção foi colocada no



$$P = V \times I(\text{equação 4})$$

$$2 = 9 \times I$$

$$I = 0,22 \text{ A}$$

em que:

P é a potência aplicada pelo elemento aquecedor (W);

V é a tensão fornecida (V);

I é a intensidade da corrente elétrica (A).

Com base no valor da intensidade de corrente elétrica necessária para o funcionamento da sonda de aquecimento calculou-se o valor da resistência elétrica do elemento aquecedor, utilizando novamente a lei de Ohm (equação 5).

$$P = R \times I^2 \quad (\text{equação 5})$$

$$2 = R \times 0,22^2$$

$$R = 41,32 \Omega$$

em que:

P é a potência aplicada pelo elemento aquecedor (W);

R é a resistência do elemento aquecedor ( $\Omega$ );

I é a intensidade da corrente elétrica (A).

Embora o valor de resistência elétrica calculada tiver sido de 41,32  $\Omega$ , utilizou-se um resistor de 39  $\Omega$ , pois não foi encontrada uma resistência elétrica com valor idêntico ao calculado, sendo o resistor de 39  $\Omega$  o valor mais próximo.

Como a resistência elétrica utilizada para construção da sonda possuía um valor inferior ao calculado foi necessário realizar a correção do valor da potência de aquecimento da sonda superior, através da equação 6.

$$P = R \times I^2 \quad \text{(equação 6)}$$

$$P = 39 \times 0,22^2$$

$$P = 1,89 \text{ W}$$

Em que:

P é a potência aplicada pelo elemento aquecedor (W);

R é a resistência do elemento aquecedor ( $\Omega$ );

I é a intensidade da corrente elétrica(A).

A corrente elétrica necessária para o funcionamento da sonda aquecida foi fornecida por um regulador de tensão conectado a uma fonte de energia de 12 V. O regulador de tensão(Figura 7) foi construído para reduzir a tensão de 12 V, fornecida pela fonte de energia, para uma tensão de 9 V, fornecendo uma intensidade de corrente elétrica de 0,22A de forma constante, para isso foram necessários 10 reguladores, um para cada sonda de aquecimento. Todos os componentes eletrônicos (reguladores de tensão, capacitores, fontes de energia e resistores) utilizados na confecção dos sensores foram testados com auxílio de multímetro digital, buscando aferir e padronizar a leitura.

As fontes de alimentação dos circuitos eletrônicos dos sensores estavam ligadas na rede elétrica local de 110 V.

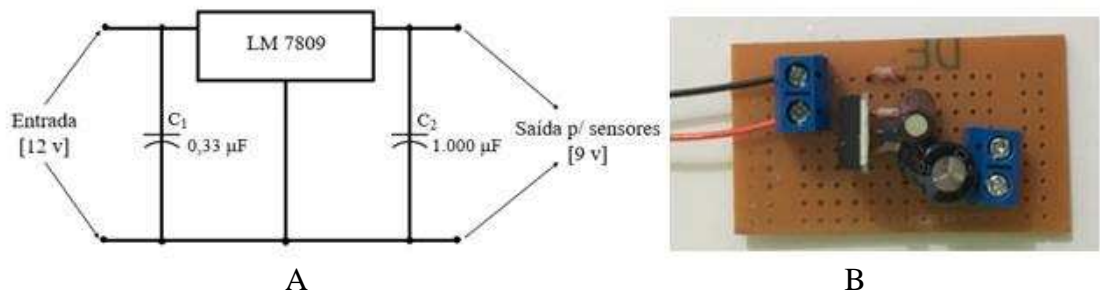


Figura 7. (A) Esquema do circuito eletrônico do regulador de tensão, (B) regulador de tensão construído.

Para a instalação dos sensores, foram retiradas as bainhas das folhas que estavam presentes no caule e feitos dois orifícios de diâmetro de 0,8 cm, a uma distância vertical de 10 cm entre si, com auxílio de uma furadeira elétrica. As sondas foram revestidas com pasta térmica para uma melhor condução de calor, introduzidas no interior do caule. Após a instalação das sondas, o segmento do caule foi revestido com manta térmica de neopreno de 2 mm, para minimizar o efeito do gradiente térmico natural sobre as medidas de fluxo de seiva e cobertores de plástico transparente para proteção contra chuva (Figura 8).

Antes da instalação dos sensores no campo, foram realizadas aferições desses equipamentos no laboratório. Os sensores foram imersos em água a diferentes temperaturas, para verificação da temperatura medida pelo sensor e comparação com o valor obtido com termômetro de mercúrio. Após 5 minutos de estabilização realizou-se as calibrações necessárias para uniformização da leitura da temperatura.

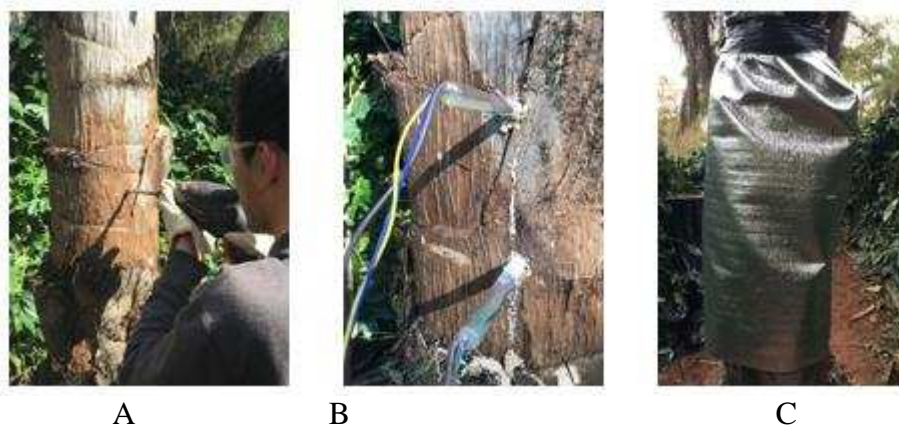


Figura 8. Procedimento para instalação dos sensores de fluxo de seiva em plantas de macaúba. (A) processo de abertura do orifício no caule, (B) sondas inseridas no caule, (C) segmento do caule isolado com neopropeno.

Para o registro dos valores de temperaturas dos sensores de fluxo de seiva, foram utilizados três módulos seriais de aquisição de dados (modelo LR-7018, ICP COM) e um módulo conversor (modelo LR-7561, ICP COM), ambos estavam conectados aos sensores por meio dos cabos dos termopares (Figura 9). Os dados eram transmitidos do módulo conversor para um microcomputador, através de um cabo BD-9 conectado a porta serial do microcomputador, onde foram gerenciados por um programa desenvolvido para esta finalidade. O programa mencionado foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C H. Os dados de temperatura foram medidos a cada 10 s e os valores médios armazenados em intervalos de um minuto, totalizando 1440 medições por dia.

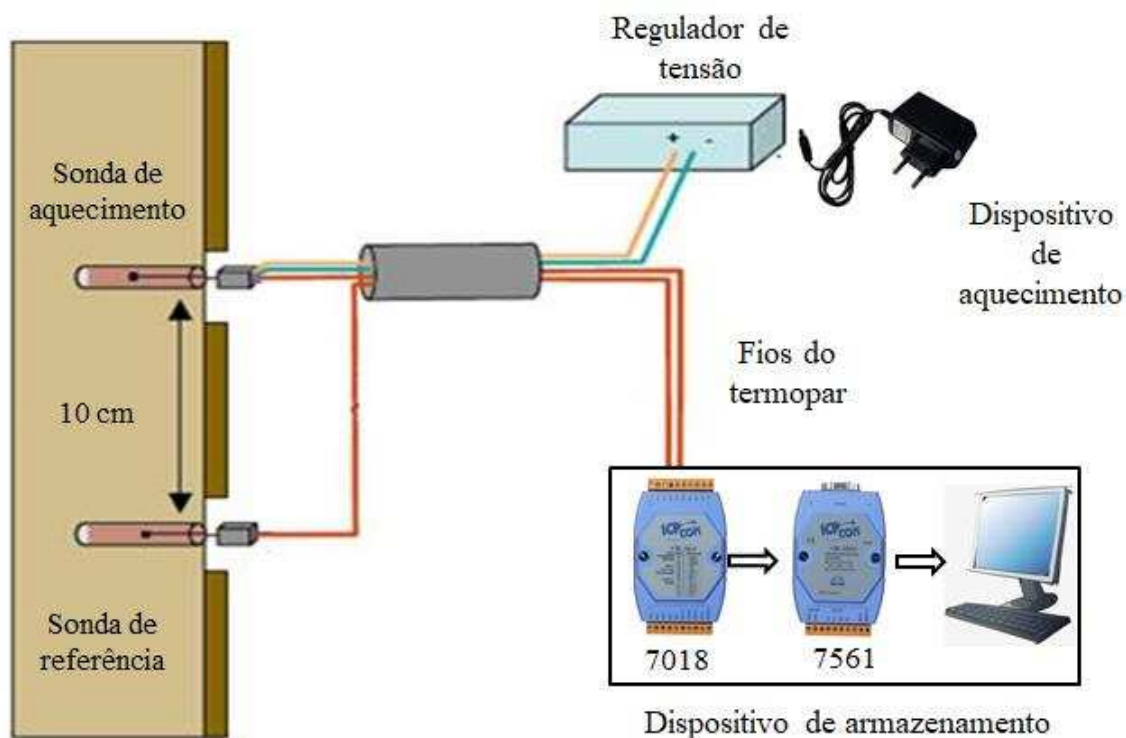


Figura 9. Representação esquemática do sistema de dissipação térmica (adaptado de Verdier 2006).

#### 4.4 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Para avaliar a influência das variáveis meteorológicas na transpiração da macaúba, foram utilizados dados da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, localizada a aproximadamente 350 metros da área experimental. A estação registrou valores horários de velocidade do vento ( $u$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ), temperatura do ar ( $T_{\text{ar}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa do ar (UR, %), radiação solar global ( $R_s$ ,  $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ) e precipitação ( $P$ , mm).

Com base nos dados meteorológicos estimou-se a evapotranspiração de referência utilizando o modelo, Penman-Monteith, parametrizado por Allen et al (2006), descrito de acordo com a equação 4.

$$E_{To} = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (\text{Equação 4})$$

em que:

$E_{To}$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$Rn$  é o saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );

$G$  é a densidade de fluxo de calor do solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );

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

$u_2$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ );

$e_s$  é pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );

$e_a$  é a pressão de vapor atual ( $\text{kPa}$ );

$\Delta$  é a declividade da curva de pressão de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$ ); e

$\gamma$  é coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

#### 4.5 UMIDADE NO SOLO

O conteúdo de água no solo foi monitorado continuamente com o uso de 5 sensores de umidade, modelo CS655 (Campbell Scientific, USA) baseados na técnica de reflectometria no domínio do tempo (Figura 10). Os sensores foram instalados na profundidade de 40 cm de profundidade, onde se verificou a maior densidade de raízes ativas. Os dados de umidade do solo foram registrados a cada hora por um datalogger (CR3000, Campbell Scientific, USA) conectado aos sensores. As medidas foram realizadas durante o período de mensuração do fluxo de seiva.

Para calibração dos sensores foram retiradas amostras de solo indeformadas na profundidade de 40 cm na área experimental, utilizando segmentos de tubo PVC de 0,15 m de comprimento por 0,1 m de diâmetro. Posteriormente, as amostras foram levadas para o laboratório e colocadas em recipiente com água, a fim de atingir a saturação do

solo. Após esse procedimento, foram inseridos os sensores em cada amostra de solo. As leituras de umidade foram realizadas com frequência diária, desde a saturação até valores próximos ao ponto de murcha permanente. Ao realizar as leituras de umidade volumétrica do solo no sensor, as amostras eram pesadas para se obter a medida real da umidade do solo com base em massa. Como o volume da amostra era conhecido, foi possível determinar os valores na base de volume. De posse desses dados, foi obtida a equação de ajuste para o sensor, mediante análise de regressão simples.

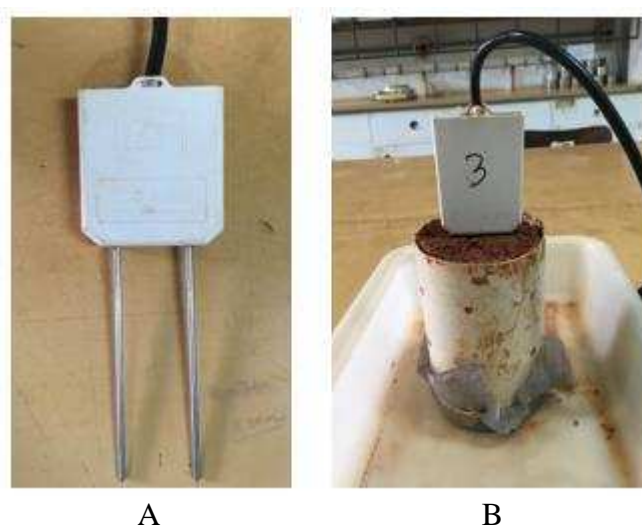


Figura 10. (A) sensor de umidade do solo, (B) amostra de solo com sensor para calibração.

#### 4.6 ANÁLISE DE DADOS

Após a estimativa da transpiração foi realizada a análise do curso médio da transpiração da macaúba para o período de avaliação e a sua variação quanto a posição de instalação do sensor no caule (norte e sul). Em seguida, caracterizou-se os dias durante o experimento de acordo índice de claridade ( $K_t$ ), que foi obtido pela razão entre a radiação solar global ( $H_g$ ) e a no topo da atmosfera ( $H_0$ ) (ALLEN et al., 1998). Adotou-se seguinte classificação:  $K_t \leq 0,3$  – céu nublado,  $0,3 < K_t < 0,7$  – céu parcialmente nublado e  $K_t \geq 0,7$  – céu limpo (PORFIRIO et al., 2012).

Com base nessa caracterização, foram selecionados dias em que as curvas de transpiração da macaúba representaram o curso diurno, apenas para as condições de céu

parcialmente nublado e nublado, pois não foi obtido nenhum dia sob as condições de céu limpo. Além disso, realizou-se análises de variância ( $p \leq 0,05$ ) e, posteriormente, as análises de regressão para avaliar a relação entre transpiração e o déficit de pressão de vapor (DPV), radiação solar global ( $R_g$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e umidade do solo ( $\theta$ ).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DO EXPERIMENTO

Durante o período de avaliação experimental foram obtidos valores de temperatura média do ar entre 15,9 e 22,6 °C, com valor médio de 19,1 °C (Figura 11A). Para a radiação solar global, registrou-se um valor médio diário de 15,06 MJ m<sup>-2</sup>, com valores extremos de 2,89 e 24,9 MJ m<sup>-2</sup>, registrado sob condição de céu nublado e parcialmente nublado respectivamente (Figura 11B). No que se refere ao déficit de pressão de vapor (DPV), foram obtidos valores mínimos de 0,17 e máximos de 0,95kPa, com valor médio de 0,58 kPa (Figura 11C). A umidade relativa do ar média foi de 78,5%, com valores máximo de 93,21 e mínimo de 64,83% (Figura 11D). A velocidade do vento apresentou valores entre 0,27 e 2,08 m s<sup>-1</sup>(Figura 11E).

Os elementos meteorológicos podem influenciar diretamente e indiretamente o fluxo de seiva e, conseqüentemente, a transpiração (CHEM et al., 2014). Diversos estudos revelaram que o fluxo de seiva possui uma relação positiva com os elementos meteorológicos. Entretanto, a resposta a essas variáveis pode variar de acordo com as características fisiológicas e estruturais da planta e com o conteúdo de água no solo (TIE et al., 2017).

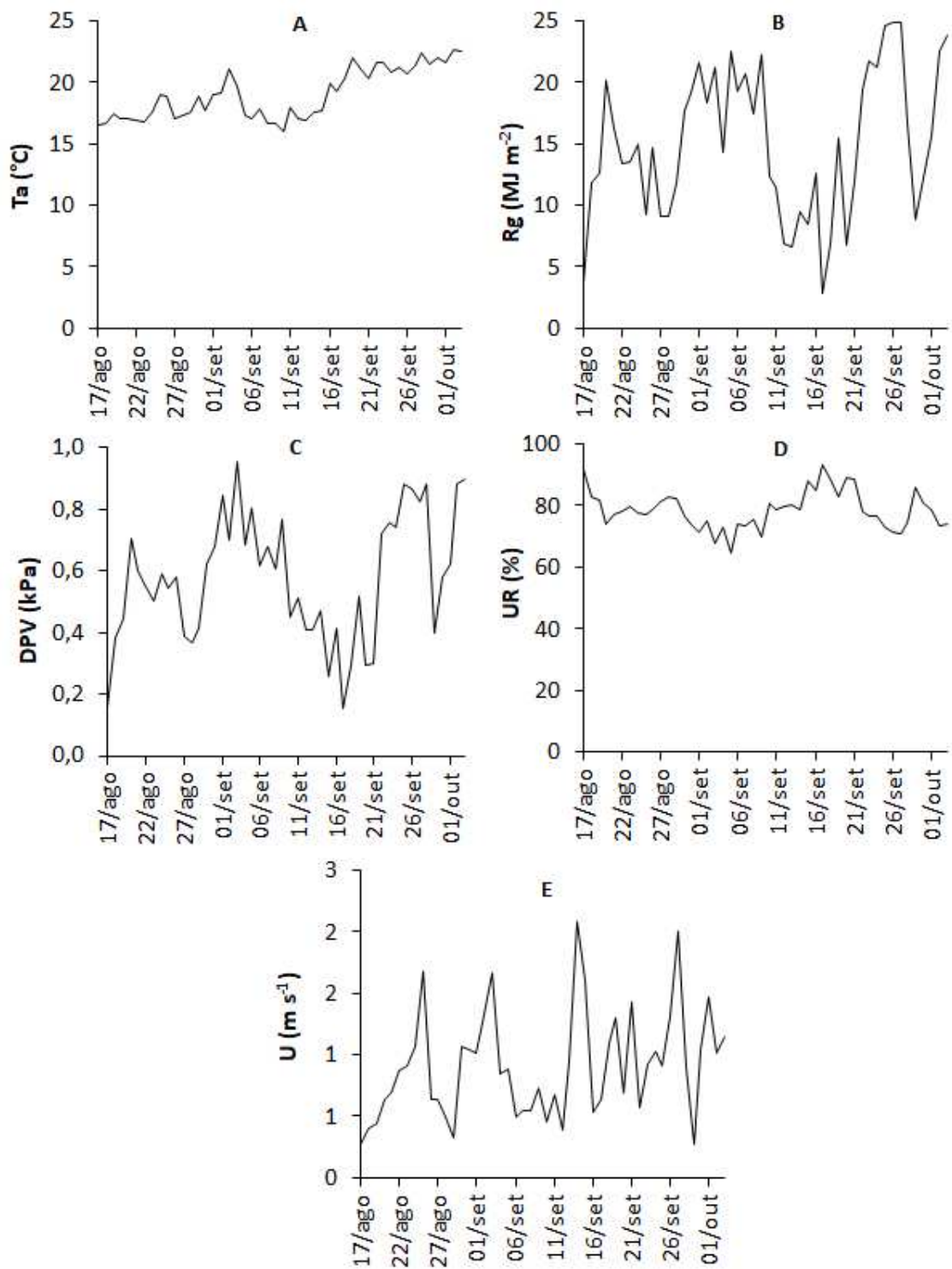


Figura 11. Variação diária da temperatura média do ar -  $T_a$  (A), radiação solar global -  $R_g$  (B), déficit de pressão de vapor -  $\text{DPV}$  (C), umidade relativa do ar -  $\text{UR}$  (D) e velocidade do vento (E).

Para a precipitação diária acumulada, observou-se um valor máximo de 12 mm, com um acumulado total para o período do experimento de aproximadamente 60 mm, em que cerca de 60% desse valor foi observado em 4 dias. O conteúdo de água

no solo, na profundidade de 0,4 m, oscilou de 34 a 27%, que corresponde respectivamente a 72,3 e 61% da capacidade de campo (Figura 12). Essa variável respondeu ao evento de chuva se o total acumulado ao longo de um período de 3 a 5 dias ultrapassasse 10 mm.

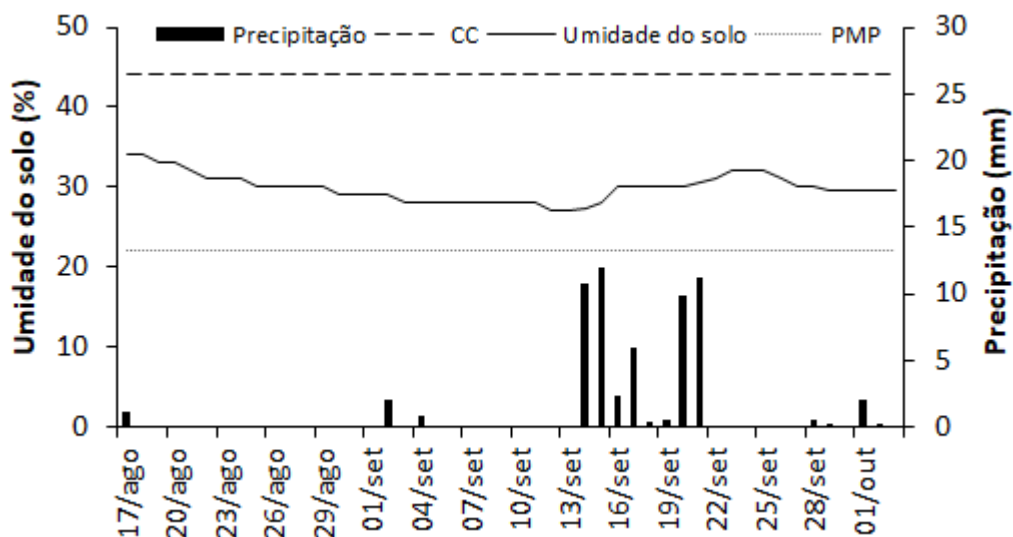


Figura 12. Precipitação acumulada em 24 horas (mm), umidade do solo (%) expressa em termo de média diária, umidade na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) na profundidade de 40 cm.

## 5.2 CURSO MÉDIO DIÁRIO DA TRANSPIRAÇÃO EM RELAÇÃO AOS FATORES METEOROLÓGICOS

O curso médio diário da transpiração e das variáveis meteorológicas para o período de avaliação encontra-se ilustrado na Figura 13. A transpiração refletiu a mudança diurna da radiação, déficit de pressão de vapor e evapotranspiração de referência, seguindo um padrão típico em forma de sino. Nas primeiras horas após o nascer do sol, ocorreu um rápido aumento da transpiração, impulsionada pelo movimento da água armazenada nos tecidos vegetais, atingindo o valor máximo de 4,8 L h<sup>-1</sup> às 13h. Após esse pico, a transpiração caiu lentamente até às 15h, quando sofreu uma diminuição acentuada, devido à alta demanda evaporativa do ar. Esse fato é representativo da ação do controle estomático sob a transpiração, medida para evitar

adesidratação das folhas. Por volta das 23h, ocorreu a estabilização da transpiração (Figura 13).

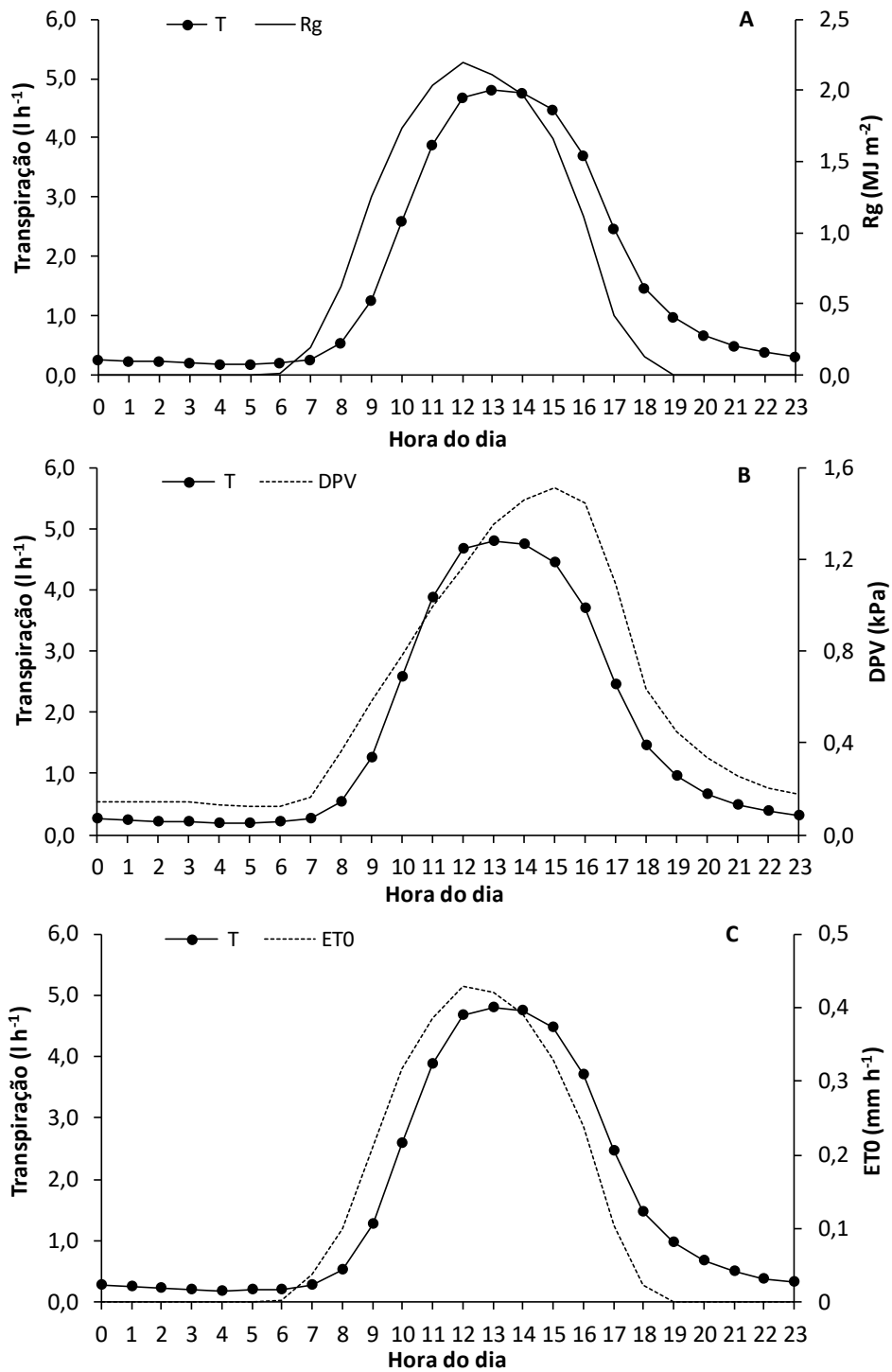


Figura 13. Curso horário entre a transpiração e a radiação solar (A), déficit de pressão de vapor (B) e evapotranspiração de referência (C), valores médios para o período de 17 de agosto a 03 de outubro de 2018.

A abertura estomática é dependente do estado hídrico da folha e da demanda evaporativa do ar. Existem numerosas observações de que a condutância estomática diminui em resposta ao aumento do déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar, e que a resposta está relacionada à taxa de transpiração foliar. Pires et al. (2013), ao estudarem o comportamento de variáveis fisiológicas de plantas de macaúba juvenis em condições de campo, verificaram que a partir das 13h ocorreu uma redução da condutância estomática limitando, assim, a transpiração da planta.

Madurapperuma et al. (2009), estudando o comportamento da transpiração de *Cocos nucifera*, verificou comportamento semelhante ao estudo, em que o rápido declínio no início da tarde resultou das elevadas taxas de transpiração durante o período da manhã, que reduz rapidamente as reservas de água acessíveis ao sistema radicular e o suprimento de água armazenados nos tecidos do caule. Esse mecanismo de armazenamento de água no caule já foi relatado para várias espécies de palmeiras (HOLBROOK & SINCLAIR, 1992; MADURAPPERUMA et al., 2009; SPERLING et al., 2012).

Foi possível notar a existência da transpiração durante o período noturno, resultante da recarga do tecido do caule, decorrente, possivelmente, da tentativa de recuperação do déficit hídrico acumulado ao longo do dia. O fluxo noturno de seiva pode estar relacionado ao estado hídrico da planta, uma vez que contribui parcialmente para o reabastecimento das reservas internas de água esgotadas durante o dia anterior, quando a água disponível no solo é suficiente (DALEY & PHILLIPS, 2006).

Observou-se que a transpiração não acompanhou as variáveis meteorológicas com precisão ao longo do tempo, atingindo o máximo valor de transpiração uma hora após os máximos valores diários registrados de radiação solar global e evapotranspiração de referência (Figura 13 A e C). Contudo, para o déficit de pressão de

vapor observou-se uma defasagem temporal ainda maior (Figura 13B). A defasagem observada da transpiração em relação aos elementos meteorológicos ocorreu, possivelmente, devido à resistência hidráulica oferecida pelos tecidos condutores ao fluxo de água, verificada especialmente em estudo de estimativa de transpiração em plantas de grande porte, conforme demonstrados por diversos autores (HORNA et al., 2011).

Sperling et al. (2012) relataram em estudo de transpiração em *Phoenix dactylifera*, aplicando o método de dissipação térmica, a presença de uma defasagem entre os máximos valores obtidos pelo sensor de dissipação térmica em relação às medidas realizadas por lisímetros, resultado da combinação da condição fisiológica da planta com questões técnicas relacionadas aos sensores.

A longa defasagem observada entre a transpiração e o déficit de pressão de vapor pode ser explicada pelo balanço de energia. Inicialmente, a energia solar aquece a superfície do solo armazenando calor. Em seguida a superfície aquece o ar em contato ocasionando transporte convectivo deste calor até a altura das medidas de temperatura e umidade relativa do ar, variáveis utilizadas para o cálculo de déficit de pressão de vapor (PEREIRA et al., 2013).

Para o período de avaliação, obteve-se um valor médio diário de transpiração de  $35 \text{ L plantas}^{-1}$ , considerando:  $T_a = 19,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $R_g = 15,06 \text{ MJ m}^{-2}$  e  $DPV = 13,87 \text{ kPa}$ . Em estudo realizado para quantificar a transpiração em plantas de palma de óleo na Indonésia, utilizando o método de dissipação térmica aplicado em plantas de 12 anos, os autores relataram um valor médio de  $80 \text{ L dia}^{-1}$  (NIU et al., 2015; HARDANTO et al., 2017). Enquanto que Roll et al. (2015) identificaram um valor de transpiração de  $94 \text{ L dia}^{-1}$  para plantas de palma de óleo na mesma região.

Madurapperuma et al. (2009) encontraram um valor médio de 96 L dia<sup>-1</sup> para transpiração de planta de Cocos nucifera com 20 anos de idade no Sri Lanka. Sperling et al. (2012) obtiveram valores de 87 L dia<sup>-1</sup> de transpiração para Phoenix dactylifera irrigadas com 10 anos de idade no sul de Israel.

Portanto, o valor médio diário de transpiração das plantas de macaúbas encontrada neste estudo são inferiores aos valores de transpiração encontrado na literatura para demais palmeiras, possivelmente devido às diferenças das condições climáticas e fisiológicas das plantas avaliadas.

### **5.3 VARIAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO NAS FACES NORTE E SUL DO CAULE**

A avaliação da transpiração em relação à posição de inserção do sensor no caule da planta verificou um atraso do curso diário da transpiração do sensor localizado na face norte em relação ao da face sul (Figura 14). De um modo geral, a transpiração atingiu o valor máximo de 4,78 L h<sup>-1</sup> para a face sul às 12h, enquanto que os sensores instalados na face norte registram o maior valor somente às 14h, de 5,01 L h<sup>-1</sup>, para o pico de radiação solar de 14 MJ m<sup>-2</sup> às 12h. Contudo, apesar da defasagem observada, os sensores instalados na posição norte apresentaram um valor de transpiração apenas 5% maior em relação ao valor estimado pelos sensores localizados na posição sul. Essa diferença no comportamento da transpiração é possivelmente consequência da variação da exposição da copa e do caule à radiação solar.

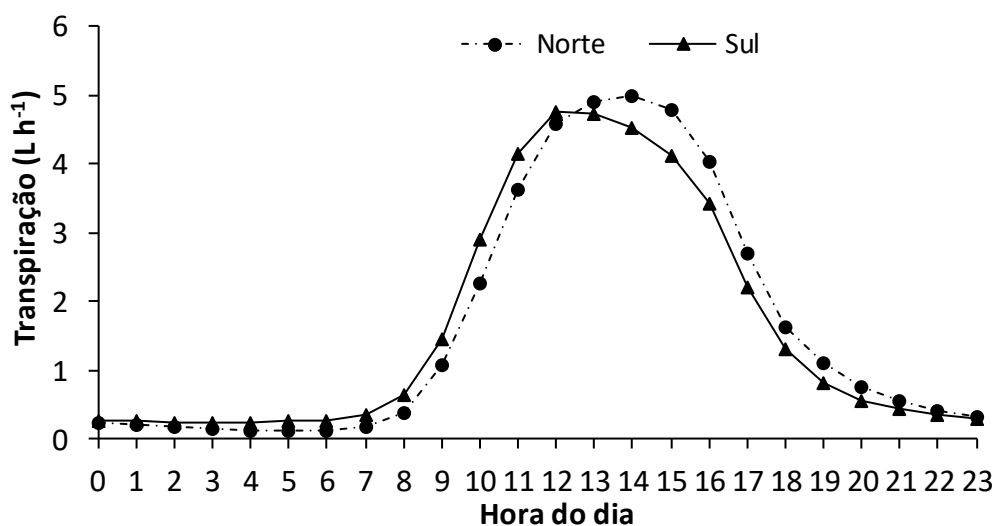


Figura 14. Curso horário da transpiração na face norte e sul do caule.

Pimentel et al. (2010), trabalhando com cafeeiro de 4 anos na região de Guaranhos, PE, utilizando o método de dissipação, não verificaram variação da transpiração em nenhuma posição cardinal do caule, em função da proximidade com a linha do equador.

Apesar da variação da transpiração na posição norte e sul do caule ser reduzida é importante a avaliação em diferentes posições. A transpiração varia de acordo com a espécie e mesmo entre indivíduos da mesma espécie. Tsuruta et al. (2010) relataram que tais estimativas podem resultar em erros relativos de 40% do máximo da transpiração em *Chamaecyparis obtusa*. Enquanto, que Tateishi et al. (2008) observaram estimativas quanto a direção dos sensores poderia resultar em erros relativos de 10 - 20% para árvores de *Quercus glauca*.

#### **5.4 TENDÊNCIAS DIURNAS DA TRANSPIRAÇÃO PARA PLANTAS DE MACAÚBA SOB CONDIÇÕES DE CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E NUBLADO**

Na Figura 15 estão apresentados os cursos diários da transpiração e da radiação solar global para condições de céu parcialmente nublado (A) e nublado (B) ao longo de dois dias consecutivos. Durante os dias de céu parcialmente nublado, 07 e 08 de setembro de 2018, a transpiração máxima da macaúba esteve próxima  $4,2 \text{ L h}^{-1}$ , quando o valor médio de radiação solar foi de  $19,1 \text{ MJ m}^{-2}$ . Enquanto que, para as condições de céu nublado, 17 e 18 de setembro de 2018, o máximo valor obtido para transpiração foi de  $0,9 \text{ L h}^{-1}$ , devido o baixo valor de radiação solar global registrado para esses dias,  $6,6 \text{ MJ m}^{-2}$ .

Com relação às alterações horárias da transpiração, observou-se que essa variável seguiu as variações de radiação solar global para as condições de céu parcialmente nublado (Figura 15A). Já em dias de céu nublado (Figura 15B), o sensor de dissipação térmica não foi capaz de acompanhar a variação da radiação solar global, provavelmente, devido o movimento de água no interior do caule.

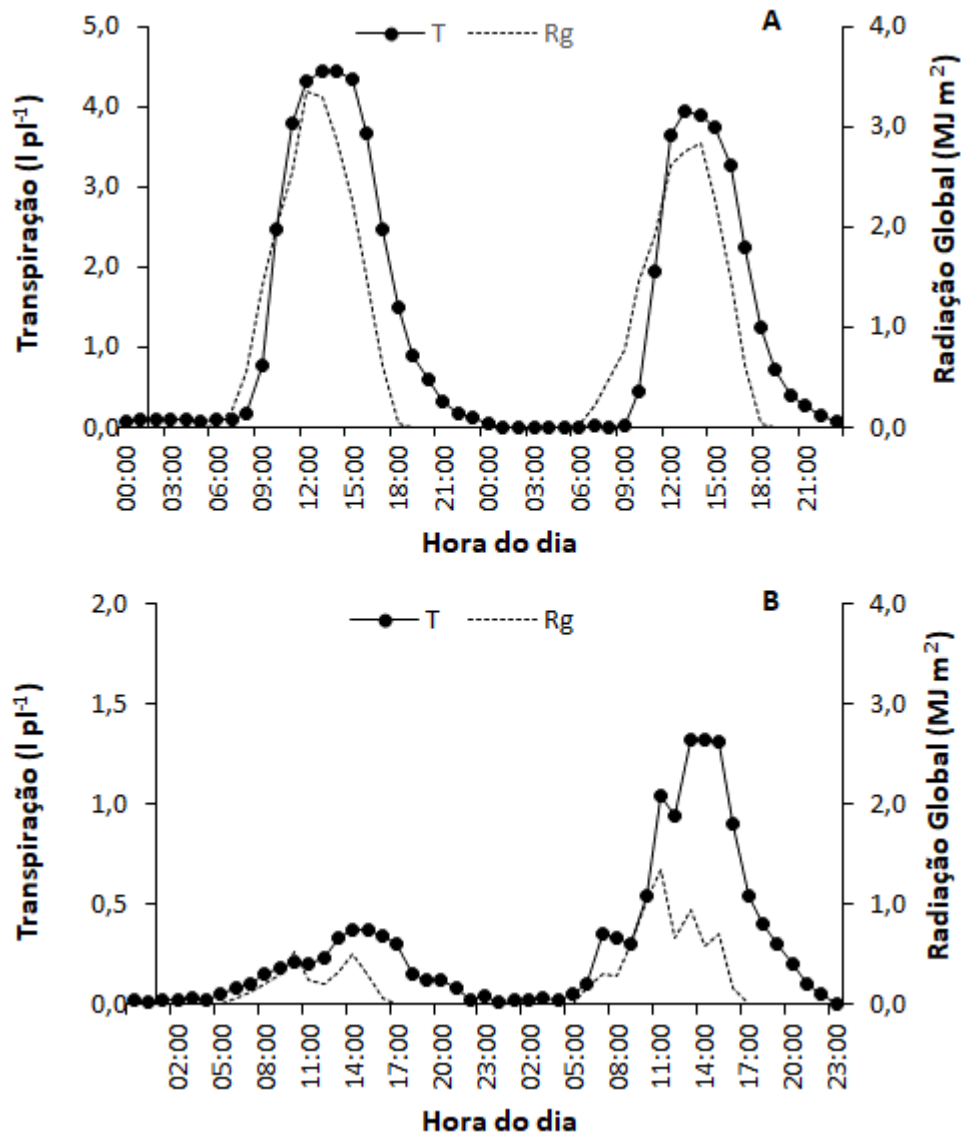


Figura 15. Evolução da transpiração, estimada por meio dos sensores de dissipação térmica, e radiação solar ao longo de dois dias consecutivos, para condições de céu parcialmente nublado (A) e nublado (B).

Roll et al. (2015) analisando o comportamento da transpiração em planta de palma de óleo, verificaram que as taxas de transpiração diária flutuavam menos do que os elementos meteorológicos.

## 5.5 RESPOSTAS DA TRANSPIRAÇÃO AOS FATORES AMBIENTAIS

Para verificar a influência das condições ambientais sob a transpiração, relacionou-se a transpiração aos principais fatores ambientais: radiação solar global, déficit de pressão de vapor, evapotranspiração de referência e umidade do solo (Figura 16). Observou-se uma tendência quadrática para relação entre a transpiração e os elementos meteorológicos, com um aumento da transpiração, até certos limites, em resposta ao aumento dessas variáveis. Esse comportamento é devido, possivelmente, ao mecanismo de ação estomática, que sob condições de alta demanda atmosférica, atua evitando a desidratação da planta, reduzindo assim a taxa de transpiração.

As maiores relações foram verificadas entre a transpiração e a radiação solar global e a transpiração e o déficit de pressão de vapor, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,54 e 0,59 (Figura 16A e B), respectivamente. A partir da equação de ajuste, estimaram-se os valores máximos de transpiração sendo de 40,5 L dia<sup>-1</sup> e 42,5 L dia<sup>-1</sup> para esses elementos meteorológicos, radiação solar global e déficit de pressão de vapor. Esses resultados corroboram com encontrado por Juhas et al. (2013) em estudo de consumo de água em cerejeiras, onde verificaram o maior valor do coeficiente de determinação para relação entre transpiração e o déficit de pressão de vapor, resultados que reforçam a interação dos elementos meteorológicos com a transpiração.

Quando se relacionou a transpiração com a evapotranspiração de referência (Figura 16C), obteve-se um menor valor para o coeficiente de determinação ( $R^2= 0,48$ ), pois o a evapotranspiração de referência é o resultado da ação de diversas variáveis meteorológicas como velocidade do vento, radiação solar global e déficit de pressão de vapor. O máximo valor da transpiração estimado a partir da equação obtida foi de 40,77 L dia<sup>-1</sup>. Liuet al. (2012) também encontraram relação mais forte com um único fator

meteorológico do que com um indicado mais abrangente, como a evapotranspiração de referência.

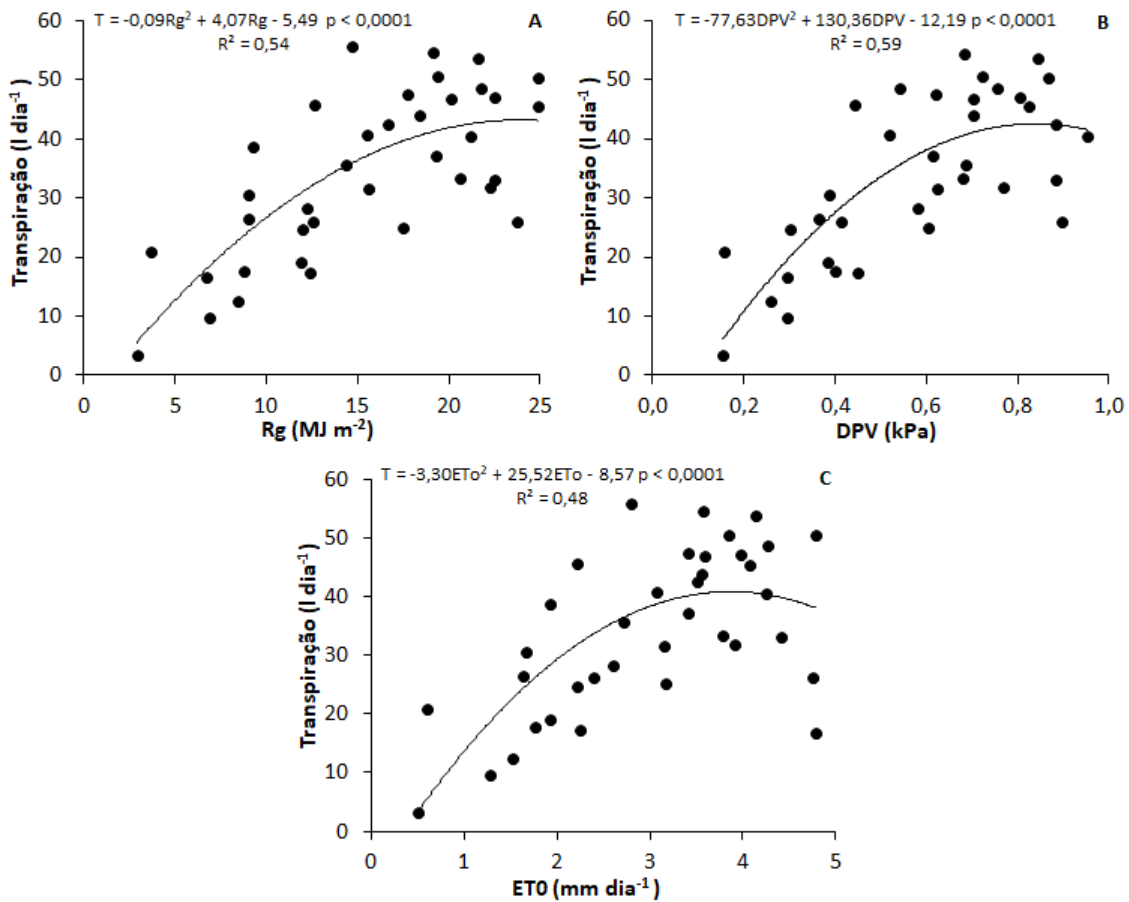


Figura 16. Relação da transpiração média diária com a radiação solar global (A), déficit de pressão de vapor (B) e evapotranspiração de referência (C).

Com relação a variável umidade do solo, não foi verificada relação expressiva, provavelmente devido à pequena variação observada dessa variável durante o período de avaliação, sugerindo que as plantas analisadas não estavam sob estresse hídrico. Este resultado está de acordo com estudo conduzido por Tie et al. (2017) em floresta nativa no Norte da China, em que a baixa variação da umidade do solo não exerceu influência sob a transpiração. Além disso, a escala temporal da dinâmica da umidade do solo pode não corresponder bem à dinâmica do fluxo de seiva, o que torna a quantificação do impacto da disponibilidade de umidade do solo na transpiração mais difícil (FORDET al., 2005).

## **6 CONCLUSÕES**

O método de dissipação térmica utilizado na estimativa da transpiração mostrou-se eficaz para a macaúba.

Durante o período do experimento o valor médio da transpiração da macaúba foi de 35 L dia<sup>-1</sup>.

Os sensores de dissipação térmica instalados na posição norte do caule apresentaram um valor 5% superior para transpiração em relação aos instalados na posição sul.

## **7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Analisar o comportamento da transpiração em diferentes estações do ano.

Avaliar a influência das variáveis biométricas da planta na transpiração.

Mensurar a resistência hidráulica oferecida pelo tecido condutor ao fluxo de seiva.

Verificar o tempo máximo de permanência do sensor na planta.

## **8 LIMITAÇÕES**

A presença de uma pequena defasagem da transpiração estimada pelo método de dissipação térmica em relação aos elementos meteorológicos.

Curto período de permanência do sensor na planta para se obter resultados confiáveis.

Necessidade de validação dos sensores de dissipação térmica.

## 9REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos(**Estudio Riego y Drenaje Paper, 56**). Roma: **FAO, 2006. 298 p.**

ALMEIDA, C. A. B. OLIVEIRA, I. A. SILVA NETO, J. A. SILVA, C. J. Transpiração em Coffea canephora l. Via balanço de calor no caule e lisímetro de pesagem eletrônica. **Holos**, Natal, v.3, p. 62-75, 2016. <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.3041>

ARAÚJO, M. C. ESTEVES, B. S. SOUSA, E. F. Método de dissipação térmica para determinação do fluxo de seiva em coqueiro anão-verde. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p.558-562, 2012.

BARBOSA, L. M. **Manual para recuperação de áreas degradadas do Estado de São Paulo**: Matas ciliares do interior paulista. São Paulo, SP. 2006. 129 P.

BETHENOD, O. KATERJI, N. GOUJET, R. BERTOLINI, J. M. RAMA, G. Determination and validation of corn crop transpiration by sap flow measurement under field conditions. **Theoretical and Applied Climatology**, Viena, v. 67, p. 153-160, 2000.

BICALHO, E. M. MOTOIKE, S. Y. BORGES, E. E. L. ATAÍDE, G. M. GUIMARÃES V. M. Enzyme activity and reserve mobilization during Macaw palm (*Acrocomia aculeata*) seed germination. **Acta Botanica Brasilica**, Porto Alegre, v. 30, n. 3, p. 437-444, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-33062016abb0181>.

BUSATO, C. FONTES, P. C. R. BRAUN, H. BUSATO, C. C. M. Estimativa da área foliar da batateira, cultivar Atlantic, utilizando dimensões lineares. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 702-708, 2010.

CASTRO, C. A. O. RESENDE, R. T. KUKI, K. N. CARNEIRO, V. Q. MARCATTI, G. E. CRUZ, C. D. MOTOIKE, S. Y. High-performance prediction of macauba fruit biomass for agricultural and industrial purposes using Artificial Neural Networks. **Industrial Crops & Products**, Oxford, v. 108, p. 806–813, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.031>

CERMAK, J. DEML, M. PENKA, M. A new method of sap flow rate determination in trees. **Biologia Plantarum**, Praga, v.15, p. 171–178, 1973.

CÉSAR, A. S. ALMEIDA, F. A. SOUZA, R. P. SILVA, G. C. ATABANI, A. E. The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) anon-edible biodiesel feedstock in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 49, n. 5, p. 1213–1220, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.125>

CHEN, D. WANG, Y. LIU, S. WEI, X. WANG, X. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 136, p. 23-33, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.001>

CLEARWATER, M. J. LUO, Z. MAZZEO, M. DICHIO, B. An external heat pulse method for measurement of sap flow through fruit pedicels, leaf petioles and other small-diameter stems. **Plant, Cell and Environment**, Nottingham, v. 32, p. 1652–1663, 2009. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02026.x>

CORLEY, R.H.V. & TINKER, P.B., **The Oil Palm**. Fourth Edition Nova Jersey: World Agricultura Series, 2007. 562 p.

CORSER, S. M. MOTOIKE, S. Y. CORRÊA, T. P. PIRES, T. P. RESENDE, M. D. V. Breeding of *Acrocomia aculeata* using genetic diversity parameters and correlations to select accessions based on vegetative, phenological, and reproductive characteristics. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 4, p. 1-11, 2016. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr15048820>.

COSTA, E. MARTINS, R. F. FARIA, T. A. C. MARCAL, H. A. J. LEAL, P. A. M. Seedlings of *acrocomia aculeata* in different substrates and protected environments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 3, p. 395-404, 2014.

DALEY, M. J. PHILLIPS, N. G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest. **Tree Physiology**, Oxford, v. 26, p. 411–419, 2006. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/26.4.411>

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: Processos, causas e estratégias de recuperação**. Belém, PA. 2011. 7 p.

ER-RAKI, S. EZZAHAR, J. KHABBA, S. JARLAN, L. KHARROU, M. H. CHEHBOUNI, G. Micrometeorology tools for measuring evapotranspiration from the leaf to theregion. In: **Evapotranspiration: Processes, Sources and Environmental Implications**. Nova Publishers, 2013. p. 1–22.

FORD, C. R. GORANSON, C. E. MITCHELL, R. J. WILL, R. E. TESKEY, R. O. Modeling canopy transpiration using time series analysis: a case study illustrating the effect of soil moisture deficit on *Pinus taeda*. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 130, p. 163–175, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.03.004>

FUCHS, S. LEUSCHNER, C. LINK, R. CONERS, H. SCHULDT, Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 244-245, p. 151-161, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.003>

GEBAUER, T.; HORNA, V.; LEUSCHNER, C. Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. **Tree Physiology**, Oxford, v. 28, p. 1821-1830, 2008.

GRANIER, A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. **Tree Physiology**, Oxford, v.3, p.309-320, 1987.

GRANIER, A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestieres**, Paris, v.42, p.193-200, 1985.

GREEN, S. CLOTHIER, B. JARDINE, B. Theory and Practical Application of Heat Pulse to Measure Sap Flow. **Agronomy Journal**, Oxford, v.95, n.6, p.1371-1379, 2003. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2003.1371>

GRIME, V. L. MORISON, J. I. L. SIMMONDS, L. P. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, p. 1–25, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02187-O](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(94)02187-O)

HARDANTO, A. RÖLL, A. HENDRAYANTO. HÖLSCHER, D. Tree soil water uptake and transpiration in mono-cultural and jungle rubber stands of Sumatra. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 397, p. 67-77, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.032>

HOLBROOK, N. M. SINCLAIR, T. R. Water balance in the arborescent palm, *Sabal palmetto*. I. stem structure, tissue water release properties and leaf epidermal conductance. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 15, p. 393–399, 1992. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00989.x>

HÖLTTÄ, T. LINKOSALO, T. RIIKONEN, A. SEVANTO, S. NIKINMAA, E. An analysis of Granier sap flow method, its sensitivity to heat storage and a new approach to improve its time dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 211-212, p. 2-12, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.05.005>

HORNA, V. SCHULDT, B. BRIX, S. LEUSCHNER, C. Environment and tree size controlling stem sap flux in a perhumid tropical forest of Central Sulawesi, Indonesia. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 68, p. 1027-1038, 2011. <http://dx.doi.org/10.1007/s13595-011-0110-2>.

HUBER, B. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. **Plant Biology**, v.50, p. 89–109, 1932.

HUBER, B. SCHMIDT, E. Eine Kompensationsmethode zur thermoelektrischen Messung langsamer Saftströme. **Plant Biology**, Stuttgart, v. 55, p.514–529, 1937.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Available at [www.sidra.ibge.gov.br](http://www.sidra.ibge.gov.br); 2017.

ICHIHASHI, R. KOMATSU, H. KUME, T. ONOZAWA, Y. SHINOHARA, Y. TSURUTA, K. OTSUKI, K. Stand-scale transpiration of two Moso bamboo stands with different culm densities. **Ecohydrology**, Amsterdam, v. 8, p.450–459, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/eco.1515>.

JUHÁSZ, A. SEPSI, P. NAGY, Z. TOKEI, L. HROTKÓ, K. Water consumption of sweet cherry trees estimated by sap flow measurement. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 164, p. 41-49, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.022>

KINGALU, J. M. Effects of planting density on the productivity and water use of tea (*Camellia sinensis* L.) clones I. Measurement of water use in young tea using sap flow

meters with a stem heat balance method. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 90, p. 224-232, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2007.03.005>

LIU, C. DU, T. LI, F. KANG, S. LI, S. TONG, L. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of northwest China. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 104, p. 193-202, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.014>

LU, P. URBAN, L. PING, Z. Granier's thermal dissipation probe (TDR) method of measuring sap flow in trees: theory and practice. **Acta Botanica Sinica**, Nova Iorque, v. 46, n.6, p. 631-646, 2004.

MACHADO, A. FIGUEIREDO, GUIMARÃES, M. F. Initial development of seedlings of macauba palm (*Acrocomia aculeata*). **Industrial Crops and Products**, Oxford, v. 87, n. 4, p. 14-19, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.022>

MADURAPPERUMA, W. S. BLEBY, T. M. BURGESS, S. O. Evaluation of sap flow methods to determine water use by cultivated palms. **Environmental and Experimental Botany**, Londres, v. 66, p. 372-380, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.04.002>

MADURAPPERUMA, W. S. COSTA, W.A. J. M. SANGAKKARA, U. R. JAYASEKARA, C. Estimation of water use of mature coconut (*Cocos nucifera* L.) cultivars (CRIC 60 and CRIC 65) grown in the low country intermediate zone using the compensation heat pulse method (CHPM). **Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka**, v.37, n.3, p.175-186, 2009.

MARINHO, L. B. VELLAME, L. M. FRIZZONE, J. A. TOLENTINO JÚNIOR, J. B. FRAGA JÚNIOR, E. F. F. Tabasco pepper transpiration by the heat dissipation probe method. **Water Resources and Irrigation Management**, Cruz das Almas, v. 2, n.1, p. 11-18, 2013.

MARSHALL, D. C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. **Plant Physiology**, Washington, v. 33, p.385-396, 1958.

MATIN, F. R. T. RIBEIRO, R. V. ANGELOCCI, L. R. RIGHI, E. Z. Fluxo de seiva pelo método do balanço de calor: base teórica, qualidades de medidas e aspectos práticos. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.1, p. 1-14, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052008000100001>

MEI, T. FANG, D. RÖLL, A. NIU, F. HENDRAYANTO. HÖLSCHER, D. Water Use Patterns of Four Tropical Bamboo Species Assessed with Sap Flux Measurements. **Frontiers in Plant Science**, Genebra, v.6, p. 1-12, 2016. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2015.01202>

MEIJIDE, A. RÖLL, A. FAN, Y. HERBST, M. NIU, F. TIEDEMANN, F. JUNE, T. RAUF, A. HÖLSCHER, D. KNOHL, A. Controls of water and energy fluxes in oil palm plantations: Environmental variables and oil palm age. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 239, p. 71-85, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.034>

MINER, G. L. HAM, J. M. KLUITENBERG, G. J. A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D printed sensor bodies and low-cost electronics. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 246, p. 86-97, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.012>

Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Estado da arte das pastagens em Minas Gerais**. Brasília, DF, 2015. 206 p.

MOREIRA, S. L. S. PIRES, C. V. MARCATTI, G. E. SANTOS, R. H. S. IMBUZEIRO, H. M. A. FERNANDES, R. B. A. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 256-257, p. 379-390, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.026>

MOTOIKE, S. Y. KUKI, K. The potential of Macaw Palm (*Acrocomia Aculeate*) as source of biodiesel in Brazil. **International Review of Chemical Engineering**, v. 1, p. 632-635, 2009.

NAKAI, T. ABE, H. MURAMOTO, T. NAKAO, T. The relationship between sap flow rate and diurnal change of tangential strain on inner bark in *Cryptomeria japonica* saplings. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v. 51, p.441-447, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-0040-0686-3>

NAVARRO-DÍAZ, H. J. GONZALEZ, S. L. IRIGARAY, B. VIEITEZ, I. JACHMANIÁN, I. HENSE, H. OLIVEIRA, J.V. Macauba oil as an alternative feedstock for biodiesel: Characterization and ester conversion by the supercritical method. . **Journal of Supercritical Fluids**, New York, v. 93, p. 130-137, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.supflu.2013.11.008>

NIU, F. RÖLL, A. HARDANTO, A. MEIJIDE, A. KÖHLER, M. HENDRAYANTO. HÖLSCHER, D. Oil palm water use: calibration of a sap flux method and a field measurement scheme. **Tree Physiology**, Oxford, v. 35, n. 5, p. 563–573, 2015. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tpv013>

NIU, F. RÖLL, A. MEIJIDE, A. HENDRAYANTO. HÖLSCHER, D. Rubber tree transpiration in the lowlands of Sumatra. **Ecohydrology**, Amsterdam, p. 1-16, 2017. <https://dx.doi.org/10.1002/eco.1882>

OISHI, A. C. OREN, R. STOY, P. C. Estimating components of forest evapotranspiration: A footprint approach for scaling sap flux measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, p. 1719-1732, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06013>

OISHIA, A. C. HAWTHORNEA, D. A. OREN, R. Baseline: An open-source, interactive tool for processing sap flux data from thermal dissipation probes. **SoftwareX**, Oxford, v.5, p. 139-143, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.softx.2016.07.003>

PAYERO, J. O. IRMAK, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 2, p. 191-202, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-007-0085-9>

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **EVAPOTRANSPIRAÇÃO**. Campinas: Fundag 2013. 323 p.

PIMENTEL, J. S.SILVA, T. J. A. BORGES JÚNIOR, J. C. F. FOLEGATTI, M. V. MONTENEGRO, A. A. A. Estimativa da transpiração em cafeeiros utilizando-se sensores de dissipação térmica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 187-195, 2010.

PINTO JR. O. B. VOURLITIS, G. L. SANCHES, L. DALMAGRO, H. J. LOBO, F. A. NOGUEIRA, J. S. Transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica em floresta de transição Amazônica-Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.3, p.268–274, 2013.

PIRES, T. P. SOUZA, E. S. KUKI, K. N. MOTOIKE, S. Y. Ecophysiological traits of the macaw palm: A contribution towards the domestication of a novel oil crop. **Industrial Crops and Products**, Oxford, v. 44, p. 200–210, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>

PORFIRIO, A. C. S. SOUZA, J. L. LYRA, G. B. LEMES, M. A. M. An assessment of the global UV solar radiation under various sky conditions in Maceió-Northeastern Brazil. **Energy**, v.44, p.584-592, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.042>

POTT, A. POTT, V. J. **Plantas Nativas para Recuperação de Áreas Degradadas e Reposição de Vegetação em Mato Grosso do Sul**. Campo Grande, MS, 2002. 6 p. Projeto MapBiomass. **Estatística de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <http://mapbiomas.org/stats>. Acessado em: 04 de outubro de 2017.

RABEL, I. DIEKKUGER, B. VOIGT, H. NEUWIRTH, B. Comparing DTmax Determination Approaches for Granier-Based Sapflow Estimations. **Sensors**, Indianapolis, v. 16, p. 1-16, 2016. <http://dx.doi.org/10.3399/s16122040>

RENNINGER, H. J. PHILLIPS, N. Wet- vs. Dry-Season Transpiration in an Amazonian Rain Forest Palm *Iriarteia deltoidea*. **Biotropica**, Oxford, v.42, p. 470–478, 2010. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00612.x>

RÍO, J. C. EVARISTO, A. B. MARQUES, G. MARTÍN-RAMO, P. MARTÍN-GIL, J. GUTIÉRRE, A. Chemical composition and thermal behavior of the pulp and kernel oils from macauba palm (*Acrocomia aculeata*) fruit. **Industrial Crops and Products**, Oxford, v. 84, p. 294-304, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.018>

ROLL, A. NIU, F. MEIJIDE, A. HARDANTON, A. HENDRAYANTO. KNOHL, A. HOLSCHER, D. Transpiration in an oil palm landscape: effects of palm age. **Biogeosciences**, Hoboken, v. 12, n.19, p. 5619–5633, 2015. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-12-5619-2015>

RUBIO NETO, A. SILVA, F. G. SALES, J. F. REIS, E. F. SILVA, M. V. V. SOUZA, A. L. Effect of drying and soaking fruits and seeds on germination of macaw palm (*Acrocomia aculeata* [Jacq.] Loddiges ex MART.). **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 34, n. 2, p. 179-185, 2012. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v34i2.11752>

RUIZ-PENÁLVER, L. VERA-REPULLO, J. A. JIMENEZ-BUENDÍA, M. GUXMÁN, I. MOLINA-MARTÍNEZ, J. M. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 151, p. 103-113, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.020>

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **Journal Agricultural Meteorology**, Tóquio, v.37, p. 9–17, 1981. <http://dx.doi.org/10.2480/agrmet.37.9>

SÉRVULO, A. C. O. VELLAME, L. M. CASAROLI, D. ALVES JÚNIOR, J. SOUZA, P. H. African Mahogany transpiration with Granier method and water table lysimeter. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.21, n.5, p.322-326, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n5p322-326>

SPERLING, O. SHAPIRA, O. COHEN, S. TRIPLER, E. SCHWARTZ, A. LAZAROVITCH, N. Estimating sap flux densities in date palm trees using the heat dissipation method and weighing lysimeters. **Tree Physiology**, Oxford, v. 32, n. 9, p.1171–1178, 2012. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tps070>

STEPPE, K. PAUW, D. J. W. DOODY, T. M. TESKEY, R. O. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, p. 1046–1056, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.004>

STERLING, S. M. DUCHARNE, A. POLCHER, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. **Nature Climate Change**, Nova Iorque, v. 14, p. 385-390, 2013. <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE1690>

TATEISHI, M. KUMAGAI, T. UTSUMI, Y. UMEBAYASHI, T. SHIIBA, Y. INOUE, K. KAJI, K. CHO, K. OTSUKI, K. Spatial variations in xylem sap flux density in evergreen oak trees with radial-porous wood: comparisons with anatomical observations. **Trees**, Berlin, v. 22, p. 23-30, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-007-0165-8>

TEIXEIRA, D. A. MOTTA, C. R. RIBEIRO, C. M. S. CASTRO, A. M. A rapid enzyme catalyzed pretreatment of the acidic oil of macauba (*Acrocomia aculeata*) for chemoenzymatic biodiesel production. **Process Biochemistry**, London, v. 53, p. 188–193, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2016.12.011>

TIE, Q. HU, H. TIAN, F. GUAN, H. LIN, H. Environmental and physiological controls on sap flow in a subhumid mountainous catchment in North China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 240–241, p. 46–57, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.018>

TRCALA, M. CERMÁK. J. A new heat balance equation for sap flow calculation during continuous linear heating in tree sapwood. **Applied Thermal Engineering**, Londres, v. 102, p. 532–538, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.092>

TSURUTA, K. KUME, T. KOMATSU, H. HIGASHI, N. UMEBAYASHI, T. KUMAGAI, T. OTSUKI, K. Azimuthal variations of sap flux density within Japanese cypress xylem trunks and their effects on tree transpiration estimates. **Journal of Forest Research**, Tóquio, v. 10, p. 398-403, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s10310-010-0202-0>

VANDEGEHUCHTE, M. W. STEPPE, K. Use of the correct heat conduction–convection equation as basis for heat-pulse sap flow methods in anisotropic wood. **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 63, n. 8, p. 2833–2839, 2012. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ers041>

VERDIER, M. B. **Sap flow measurements in an adult rubber tree plantation**. 27 p. 2006. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Université d’Orsay Paris, 2006.

ZHU, L. ZHAO, P. Temporal Variation in Sap-Flux-Scaled Transpiration and Cooling Effect of a Subtropical *Schima superba* Plantation in the Urban Area of Guangzhou. **Journal of Integrative Agriculture**, Oxford, v. 12, n. 8, p. 1350-1356, 2013. [http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119\(13\)60548-1](http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(13)60548-1)