

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA CENTRO DE CIÊNCIAS
AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**

**METODOLOGIAS DE BAIXO CUSTO PARA A MODELAGEM
DA DINÂMICA DA ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-
ATMOSFERA EM SERINGUEIRA**

Geovana Paim Araújo

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2022**

METODOLOGIAS DE BAIXO CUSTO PARA A MODELAGEM DA DINÂMICA DA ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA EM SERINGUEIRA

GEOVANA PAIM ARAÚJO

Engenheira Florestal

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2019

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

Orientador: Prof. Dr. Lucas Melo Vellame

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Copquer dos Santos Júnior

FICHA CATALOGRÁFICA

A663m

Araújo, Geovana Paim.

Metodologias de baixo custo para a modelagem da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera em seringueira / Geovana Paim Araújo._ Cruz das Almas, BA, 2022.
61f.; il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Mestrado em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Melo Vellame.

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luis Copquer dos Santos Júnior.

1.Seringueira – Solo – Água. 2.Seringueira –

Evapotranspiração – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.


CDD: 633.8952

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA CENTRO DE CIÊNCIAS
AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO**


**METODOLOGIAS DE BAIXO CUSTO PARA A MODELAGEM DA DINÂMICA DA
ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA EM SERINGUEIRA**

Comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado de
Geovana Paim Araújo


Aprovada em 18 de julho de 2022

Documento assinado digitalmente
 LUCAS MELO VELLAME
Data: 20/07/2022 14:16:03-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Orientador

Documento assinado digitalmente
 JOSE VIDAL DE FIGUEIREDO
Data: 19/07/2022 13:10:10-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. José Vidal de Figueiredo
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Ceará
Examinador externo

Documento assinado digitalmente
 LUCIANO SOBRAL FRAGA JUNIOR
Data: 19/07/2022 20:46:23-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Dr. Luciano Sobral Fraga Júnior
Empresa Brasileira de Pesquisa
Agropecuária
Examinador externo

DEDICATÓRIA

Aqueles que sempre foram importantes,
mas não se encontram mais aqui
Gilmar, Gildásio, Helena e Nativo

Dedico

AGRADECIMENTOS

Á Deus pelo dom da vida e pelas bênçãos a mim concedidas;

A Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em especial ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela formação acadêmica e pessoal;

Ao Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia pela concessão da bolsa de estudos;

Aos meus pais, Tays e Gilmar (*in memorian*) e minha irmã Maria Eduarda por todo amor e carinho;

Ao meu orientador Dr. Lucas Vellame pelos direcionamentos e conselhos;

Ao meu coorientador Dr. Jorge Copquer pelo apoio;

Aos meus avós, por constituírem meu alicerce, pelo amor e doçura;

Aos meus tios Mara, Manu, Neto, Karine e Joelson por todo amor e incentivo ao meu ingresso no ensino superior;

Aos meus familiares Bia, Gabi, Janna, Tia Paloma, João Pedro, Ícaro, Samir, Flor, Kaká, Laís e Letícia por todo carinho e torcida;

A minha amiga/irmã Thaine Teixeira pelo apoio e cuidado mesmo de longe;

A Lucas e Nita pela acolhida, amizade, cuidado e puxões de orelhas;

Aos amigos Jefferson, Herbert, Israel, David, Fridha, Michelle, Vanessa, Luca, Gláucia, Juliana, Igor, Francisco por todas as palavras de incentivo;

Ao meu companheiro Iago Felipe por todo amor, parceria e ajuda durante o mestrado;

Aos técnicos e funcionários do IFBaiano, cujo apoio foi fundamental para o desenvolvimento do experimento;

Ao Laboratório de Ecofisiologia Vegetal e Meteorologia, em especial a Mabel e ao Professor Maurício pela disponibilidade e ajuda nas análises;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação profissional e pessoal;

Meu muito obrigada!!

METODOLOGIAS DE BAIXO CUSTO PARA A MODELAGEM DA DINÂMICA DA ÁGUA NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA EM SERINGUEIRA

RESUMO: Informações a respeito das relações água-solo-planta-atmosfera são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias no manejo dos recursos naturais. O estudo das relações hídricas em maior número de pontos é uma boa opção para a melhor representatividade espacial e temporal, embora apresente um alto custo. Daí, surge a necessidade da criação de sistemas alternativos de baixo custo de aquisição. Na presente dissertação são apresentados dois métodos alternativos para a modelagem da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera em seringueira. O primeiro sistema proposto estima a evapotranspiração pelo balanço de radiação na copa com base na medição por instrumentos alternativos de cinco variáveis: radiação global, radiação transmitida pela copa, temperatura do ar, temperatura da copa e velocidade do vento. Para fins de análise e discussão, a evapotranspiração foi estimada também por meio de um saldo radiômetro convencional modelo CNR4. A incerteza na estimativa da evapotranspiração utilizando o sistema proposto foi de 0,727 mm. A diferença de leitura entre o CNR4 e o sistema proposto em dias de baixo fluxo transpiratório foi convertida em erro, contribuindo para o expressivo valor na incerteza. O segundo sistema proposto estima o potencial hídrico do caule através do monitoramento contínuo de sua umidade com sensores alternativos. Mediu-se também o fluxo de seiva e potencial de água do solo. Não foi observada relação direta do potencial hídrico do caule com o fluxo de seiva. A incerteza na estimativa do potencial de água no caule utilizando medidas de umidade com sensor alternativo foi de 147,68 KPa, influenciada pela acurácia do WP4 (100 KPa) utilizado para a curva de retenção de água no caule. Os valores de fluxo de seiva, evapotranspiração e potencial hídrico do caule foram baixos quando comparados aos encontrados na literatura. Diante do pequeno período de observação, torna-se necessário o monitoramento durante um maior intervalo de tempo afim de monitorar a transpiração e fluxo de seiva e diferentes condições de demanda evaporativa da atmosfera e de conteúdo de água no solo.

Palavras-chave: evapotranspiração, potencial hídrico do caule, fluxo de seiva, balanço de radiação na copa, umidade do caule

LOW-COST METHODOLOGIES FOR MODELING WATER DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT-ATMOSPHERE SYSTEM IN RUBBER TREES

ABSTRACT: Information about water-soil-plant-atmosphere relationships is fundamental for the development of strategies in the management of natural resources. The study of water relations in a greater number of points is a good option for the best spatial and temporal representation, although it presents a high cost. Hence, the need to create alternative systems with low acquisition cost arises. In the present dissertation, two alternative methods are presented for the modeling of water dynamics in the soil-plant-atmosphere system in rubber trees. The first proposed system estimates evapotranspiration by the canopy radiation balance based on the measurement by low-cost instruments of five variables: global radiation, canopy transmitted radiation, air temperature, canopy temperature and wind speed. For analysis and discussion purposes, evapotranspiration was also measured using a conventional radiometer model CNR4 balance. The uncertainty in estimating evapotranspiration using the proposed system was 0.727 mm. The difference in reading between CNR4 and the proposed system on days of low transpiration flow was converted into an error, contributing to the expressive value in uncertainty. The second proposed system estimates the water potential of the stem by means of continuous monitoring of its moisture with low-cost sensors. The sap flow and soil water potential were also measured. There was no direct relationship between stem water potential and sap flow. The uncertainty in estimating the water potential in the stem using moisture measurements with a low-cost sensor was 147.68 KPa, influenced by the accuracy of WP4 (100 KPa) used for the stem water retention curve. In general, the values of sap flow, evapotranspiration and stem water potential were low when compared to those found in the literature. Given the short observation period, monitoring over a longer period is necessary to monitor transpiration and sap flow and different conditions of evaporative demand from the atmosphere and water content in the soil.

Keywords: evapotranspiration, stem water potential, sap flow, canopy radiation balance, stem moisture

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
HIPÓTESE	16
OBJETIVOS	16
Objetivo geral	16
Objetivos específicos	16
I. BALANÇO DE RADIAÇÃO COM INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SERINGUEIRA	17
1. INTRODUÇÃO	18
2. MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1. Descrição da área de estudo e instrumentação utilizada	20
2.2. Evapotranspiração e balanço de radiação na copa	23
2.3. Fluxo de seiva	25
2.4. Análise dos dados	29
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
3.1. Avaliação da instrumentação	30
3.2. Monitoramento da evapotranspiração e fluxo de seiva	35
4. CONCLUSÕES	37
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
II. ESTIMANDO O POTENCIAL DA ÁGUA NO CAULE PELO MONITORAMENTO CONTÍNUO DE SUA UMIDADE	43
1. INTRODUÇÃO	44
2. MATERIAL E MÉTODOS	46
2.1. Sensor de Umidade e Potencial Hídrico do Caule	46
2.2. Monitoramento de campo	49
2.3. Umidade e potencial da água do solo	50
2.4. Fluxo de seiva	52
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
3.1. Umidade e potencial da água no caule	53
3.2. Monitoramento em campo	56
4. CONCLUSÃO	58
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
CONSIDERAÇÕES FINAIS	61

INTRODUÇÃO

Nativa do Brasil, a seringueira (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg) é uma árvore de médio a grande porte, possui formato de copa simpodial formado por folhas compostas contendo três folíolos elípticos (SECCO & BIGIO, 2020). A exsudação de látex leitoso em sua casca, faz da seringueira uma das espécies arbóreas mais cultivadas no mundo com mais de 14 milhões de hectares plantados para a produção da borracha natural e seus derivados. Essa exploração pode se apresentar de forma extrativista na Floresta Amazônica, em plantios em Sistemas Agroflorestais ou em monocultivos em áreas não tradicionais de cultivo. (MENDES et al., 1992; CUNHA & LOUREIRO, 2009; ARAUJO et al., 2015; PEREIRA et al., 2020).

Informações a respeito das relações água-solo-plantat-atmosfera são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias no manejo dos recursos naturais. A lisimetria é considerada o método padrão para o monitoramento da evapotranspiração (VELLAME et al., 2012; MARTINS et al., 2017; DE CARVALHO et al., 2020), entretanto esta variável pode ser estimada pela medida da variação de armazenamento de água do solo (ZELEKE & WADE, 2012; UCAK et al., 2016; SHAHADHA et al., 2019) e por métodos micrometeorológicos. A Razão de Bowen Bowen (MACHADO et al., 2016; BUTTAR et al., 2018; SOUSA et al., 2021), Eddy Covariance (WHANG et al., 2015; ANAPALLI et al., 2018; MOORHEAD et al., 2019) e Temperatura do dossel (BARTHOLIC et al., 1970; HATFIELD et al., 1984; LUAN et al., 2021) são exemplos de métodos baseados nas variáveis micrometeorológicas.

Segundo Jackson (1982), conforme a disponibilidade de água no solo é reduzida, a transpiração diminui e por consequência a temperatura da folha é elevada, portanto o fluxo transpiratório é responsável pelo resfriamento das folhas. Este fato pode ser explicado pelo alto calor de vaporização da água, que leva as plantas a perder quantidades significativas de calor à medida que a água evapora das superfícies foliares, esse mecanismo é muito importante para a regulação da temperatura das folhas que estão expostas à radiação solar (MAGGIOTTO, 1996; CAMPECHE, 1997; LACERDA 2007).

O balanço de energia de uma folha foi proposto por Gates (1968), esse princípio pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração de toda a área da copa a partir da medição da temperatura e balanço de radiação da copa. Ao desconsiderar a

energia utilizada nos processos metabólicos, a energia absorvida pela copa é emitida em forma de ondas longas, é trocada com o ar por convecção e condução e é utilizada para evaporar a água.

Dada a complexidade das vias de transferência de água através no continuum solo-planta-atmosfera, o fluxo é geralmente calculado em função da diferença de potencial e da resistência hidráulica entre dois pontos. Federer (1982) utilizando dados obtidos em uma floresta de carvalhos adultos no Maine – EUA, constatou que a variação da densidade radicular e da resistência interna das plantas resultam em situações que a oferta não atende a demanda mesmo quando o solo está úmido.

Forster (2017), diz que o volume de água perdido pelas plantas não é de amplo conhecimento e está diretamente relacionado com o tamanho do vegetal. Ao dimensionar valores de transpiração para bacias hidrográficas, florestas ou parcelas, a quantidade de água perdida é da ordem de milhares a milhões de litros. Como esses números irão influenciar no manejo, gerenciamento e interpretações de modelos, é essencial que as medidas sejam precisas. Na investigação do uso e armazenamento de água na planta é necessário o monitoramento contínuo e combinatório do teor de água no caule e de fluxo de seiva, trabalhos que correlacionem essas variáveis são escassos na literatura, necessitando de mais estudos nessa vertente, conforme sugere Saito et al. (2016).

Muitos estudos sobre transpiração de plantas lenhosas monitoram o fluxo de seiva a partir de métodos térmicos. A estimativa da transpiração baseada nesses métodos pressupõe a equivalência entre o fluxo de seiva no tronco e o fluxo transpiratório na superfície foliar em uma escala diária. (COELHO et al., 2012; JIAN & HU, 2019; FLO et al., 2019; DANG et al., 2019). Dessa forma, possíveis causas de desvios na estimativa da transpiração são geralmente apontadas a imprecisão dos métodos de fluxo de seiva, como por exemplo, aos gradientes térmicos naturais e a distribuição radial de fluxo no caule. Na maioria dos trabalhos não são consideradas as diferenças entre os processos de transpiração e fluxo de seiva.

Uma das grandes dificuldades no monitoramento da evapotranspiração é a representatividade espacial, já que se trata de um fenômeno de superfície e dada as condições particulares de cada lugar, torna-se um obstáculo a utilização de dados já existentes na literatura mesmo de lugares geograficamente e climatologicamente próximos. Imagens de satélite são utilizadas para a estimativa da evapotranspiração de grandes áreas, entretanto, o intervalos de tempo entre as estimativas é longo

(ZHANG et al., 2016; LINS et al., 2017; ALCÂNTARA COSTA et al., 2021). O estudo das relações hídricas em maior número de pontos é uma boa opção para a melhor representatividade espacial, embora apresente um alto custo. Daí, surge a necessidade da criação de sistemas alternativos de baixo custo de aquisição.

Existe uma tendência global de queda no preço dos sensores (STATISTA RESEARCH DEPARTMENT, 2021), uma das possíveis causas atribuídas é o aumento da demanda e oferta de sensores de baixo custo para automação residencial. Em sistemas embarcados de monitoramento ambiental, em que o risco patrimonial e pessoal é baixo, o uso de sensores de baixo custo e a construção local dos sistemas de medição e aquisição de dados pode ser uma boa opção desde que devidamente calibrados e avaliados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA COSTA, J., NAVARRO-HEVIA, J., COSTA, C. A. G., DE ARAÚJO, J. C. Temporal dynamics of evapotranspiration in semiarid native forests in Brazil and Spain using remote sensing. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 3, p. e14070, 2021.

ANAPALLI, S. S., FISHER, D. K., REDDY, K. N., WAGLE, P., GOWDA, P. H., SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 228-239, 2018.

ARAÚJO, A., DE CASTRO, A., VENTURA DE ARAÚJO, L., RAMOS, R., & MELÉNDEZ, R. Análise financeira do sistema agroflorestal cacauero com seringueira na mesorregião sul baiano. **Agrotropica (Brasil)**, v. 27, n. 1, p. 15-18, 2015.

BARTHOLIC, J. F., NAMKEN, L. N., WIEGAND, C. L. Combination equations used to calculate evaporation and potential evaporation. **Combination equations used to calculate evaporation and potential evaporation.**, n. 41-170, 1970.

BUTTAR, N. A., YONGGUANG, H., SHABBIR, A., LAKHIAR, I. A., ULLAH, I., ALI, A., ... & YASIN, M. A. Estimation of evapotranspiration using Bowen ratio method. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 17, p. 807-810, 2018.

CAMPECHE, Luís Fernando de Souza Magno. **Estimativa da resistência de dossel (rc) da grama com o uso da termometria ao infravermelho**. 1997. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

COELHO FILHO, M. A., BASSOI, L., ANGELOCCI, L., COELHO, E., PEREIRA, F. D. C.. Relação solo-planta-atmosfera. In: SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação**

em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

COELHO, R. D.; VELLAME, L. M.; FRAGA JÚNIOR, E. F. Estimation of transpiration of the 'Valencia' orange young plant using thermal dissipation probe method. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.3, p.573-581, 2012

CUNHA, C. C.; LOUREIRO, C. F. B. Reservas extrativistas: limites e contradições de uma territorialidade seringueira. **Theomai**, n. 20, p. 169-185, 2009

DANG, H. Z.; QUE, X. E.; FENG, J. C.; WANG, M. M.; ZHANG, J. X. Response of sap flow rate of apple trees to environmental factors in Loess Plateau of Western Shanxi Province, China. *Ying yong sheng tai xue bao*. **The journal of applied ecology**, v. 30, p.823-831, 2019.

DE CARVALHO, R. C., MOTA, F. D., GABRIEL FILHO, L. R. A., KLAR, A. E., GRASSI FILHO, H. Lisímetro para medida da evapotranspiração na cultura do pimentão em sistema hidropônico com substrato. **IRRIGA**, v. 25, n. 2, p. 361-376, 2020.

FEDERER, C. A. Transpirational supply and demand: plant, soil, and atmospheric effects evaluated by simulation. **Water Resources Research**, v. 18, n. 2, p. 355-362, 1982.

FLO, V.; MARTINEZ-VILALTA, J.; STEPPE, K.; SCHULDT, B.; POYATOS, R. A synthesis of bias and uncertainty in sap flow methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.271, p.362-374, 2019.

FORSTER, Michael A. How Reliable Are Heat Pulse Velocity Methods for Estimating Tree Transpiration?. **Forests**, v. 8, n. 9, p. 350, 2017.

GATES, D. M. Transpiration and leaf temperature. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 19, n. 1, p. 211-238, 1968.

HATFIELD, J. L.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Evaluation of canopy temperature - evapotranspiration models over various crops. **Agricultural and forest meteorology**, v. 32, n. 1, p. 41-53, 1984.

JIAN, S., WU, Z.; HU, C. Estimation of water use of *Pinus tabulaeformis* Carr. in Loess Plateau of Northwest China. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v.67, p.271-279, 2019.

LACERDA, C. F. Relações solo-água-planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro. **Recife, PE, UFRPE. 78p**, 2007.

LACERDA, Claudivam Feitosa. Relações solo-água-planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro. **Recife, PE, UFRPE. 78p**, 2007.

LINS, F. A. C., ARAÚJO, D. C. S, DA SILVA, J. L. B., LOPES, P. M. O., OLIVEIRA, J. D. A. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido pernambucano utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 64-75, 2017.

LUAN, Y., XU, J., LV, Y., LIU, X., WANG, H., & LIU, S. Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial

distribution information measured by thermal imaging. **Agricultural Water Management**, v. 246, p. 106699, 2021.

MACHADO, N. G., BIUDES, M. S., ANGELINI, L. P., MÜTZENBERG, D. M. D. S., NASSARDEN, D. C. S., BILIO, R. D. S., DA SILVA, J. A., NEVES, G. A. R., DE ARRUDA, P. H. Z., NOGUEIRA, J. D. S.. Sazonalidade do balanço de energia e evapotranspiração em área arbustiva alagável no Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 82-91, 2016.

MAGGIOTTO, Selma Regina. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. 1996. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MARTINS, I. P., DE FARIA, R. T., PALARETTI, L. F., DALRI, A. B., OLIVERIO, C., LIBARDI, L. G. P. Lisímetros de pesagem para medidas de evapotranspiração em estufa. **IRRIGA**, v. 22, n. 4, p. 715-722, 2017.

MENDES, M. E. G., VILLAGRA, M. M., DE SOUZA, M. D., BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Relações hídricas em seringal no município de Piracicaba, SP. **Scientia Agricola**, v. 49, n. SPE, p. 103-109, 1992.

MOORHEAD, J. E., MAREK, G. W., GOWDA, P. H., LIN, X., COLAIZZI, P. D., EVETT, S. R., KUTIKOFF, S. Evaluation of evapotranspiration from eddy covariance using large weighing lysimeters. **Agronomy**, v. 9, n. 2, p. 99, 2019.

PEREIRA, A. V, FIALHO, J. de F, PEREIRA, E. B. C, JUNQUEIRA, N. T. V, MARTINS, M. A, MATTOSO, L. H. C, LIMA, W. A. A. de, DIANESE, A. de C, ALVES, R. T, VEIGA, A. D, FALEIRO, F. G, CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. DA, BRAGA, M. F, MALAQUIAS, J. V. Desempenho de clones de seringueira na região Centro-Oeste do Brasil. **Embrapa Instrumentação-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2020.

SAITO, T., YASUDA, H., SAKURAI, M., ACHARYA, K., SUEKI, S., INOSAKO, K., ... NAWATA, H. Monitoring of stem water content of native and Invasive trees In arid environments using GS3 soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 3, 2016.

SECCO, R.S.; BIGIO, N.C. 2020. *Hevea in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB22704>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

SHAHADHA, S. S., WENDROTH, O., ZHU, J., & WALTON, J. Can measured soil hydraulic properties simulate field water dynamics and crop production?. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105661, 2019.

SILVA, E. C. D., NOGUEIRA, R. J. M. C., AZEVEDO NETO, A. D. D., & SANTOS, V. F. D. Comportamento estomático e potencial da água da folha em três espécies lenhosas cultivadas sob estresse hídrico. **Acta Botanica Brasilica**, v. 17, p. 231-246, 2003.

Smart sensors: global average sales price 2010-2020. **Statista Research**

Department, 2021. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/736563/global-average-sales-price-of-smart-sensors/>> Acesso: 02/06/2022.

SOUSA, D. D. P., FERNANDES, T. F. S., TAVARES, L. B., FARIAS, V. D. D. S., DE LIMA, M. J. A., NUNES, H. G. G. C., ... & SOUZA, P. J. D. O. P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 5-22, 2021.

UCAK, A. B., GENCOGLAN, C., BAGDATLI, M. C., TURAN, N., ARSLAN, H., & INAL, B. Determination of water-efficiency relationships and silage quality characteristics of the maize species for silage (*Zea Mays* L.) The First Product Grown Under Semi-Arid Climate Conditions. **Fresen. Environ. Bull**, v. 25, n. 12A, p. 6054-6068, 2016.

VELLAME, L. M., SILVA, A. J. P. Sistema Solo-Água-Planta-Atmosfera e Manejo da Irrigação em Plantas Perenes. **Inovare Book**. p. 151-167, 2014.

VELLAME, L. M.; COELHO, R. D.; TOLENTINO, J. B. Transpiração de plantas jovens de laranjeira “Valência” sob porta-enxerto limão “Cravo” e citrumelo “Swingle” em dois tipos de solo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 1, p. 024-032, 2012.

WANG, S., PAN, M., MU, Q., SHI, X., MAO, J., BRÜMMER, C., JASSAL, R. S., KRISHNAN, P., LI, J., BLACK, T. A. Comparing evapotranspiration from eddy covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over Canada. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 4, p. 1540-1560, 2015.

ZELEKE, K. T., WADE, L. J. Evapotranspiration estimation using soil water balance, weather and crop data. In: **Evapotranspiration-Remote sensing and modeling**, p. 41-58, 2012.

ZHANG, K., KIMBALL, J. S., & RUNNING, S. W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 3, n. 6, p. 834-853, 2016.

HIPÓTESE

O monitoramento da umidade do caule, do fluxo de seiva e do balanço de radiação na copa com sensores de baixo custo possibilitam a modelagem da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera em espécies arbóreas.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Avaliar metodologias que possibilitem a modelagem da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera em espécies arbóreas.

Objetivos específicos

- (i) Avaliar um sistema de monitoramento para estimativa da evapotranspiração com base no balanço de radiação na copa da seringueira com instrumentação de baixo custo;
- (ii) Avaliar uma metodologia de monitoramento contínuo de baixo custo do potencial hídrico com base na medição de umidade do caule

I. **BALANÇO DE RADIAÇÃO COM INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA SERINGUEIRA**

RESUMO: A seringueira é uma das espécies mais plantadas no mundo para a produção de borracha natural. Portanto, a quantificação da evapotranspiração é importante para o planejamento e manejo dessas florestas uma vez que ela representa muitas vezes a principal saída da água precipitada em uma área. O objetivo do presente trabalho foi avaliar um sistema de monitoramento para estimativa da evapotranspiração com base no balanço de radiação na copa da seringueira com instrumentação de baixo custo. O experimento foi conduzido na Unidade Campo do Instituto Federal Baiano campus Valença, os dados foram coletados de 19/02/22 a 07/04/22. Em uma planta foi estimado a evapotranspiração (ET) com base no balanço de radiação na copa com um saldo radiômetro CNR4 e com a instrumentação proposta. Na mesma planta foi medido o fluxo de seiva (FS) pelo método da Razão de Calor. Os resultados de ET e de FS foram comparados entre si e com os dados de demanda evaporativa da atmosfera. Calculou-se a incerteza esperada na estimativa da ET em função da combinação das incertezas de medição. A ET média encontrada foi de $0,44 \text{ mmdia}^{-1}$ e o FS de $0,20 \text{ mmdia}^{-1}$, a incerteza na estimativa a ET foi de 0,91 mm. O sistema de monitoramento com instrumentos de baixo custo foi capaz de estimar a evapotranspiração com base no balanço de radiação na copa da seringueira, além de demonstrar melhor sensibilidade as baixas taxas de transpiração quando comparado ao balanço feito pelo CNR4.

Palavras-chave: radiação líquida, fluxo de seiva, sistemas embarcados, Arduino, termômetro de infravermelho

Radiation balance with low-cost instrumentation to estimate rubber tree evapotranspiration

ABSTRACT: The rubber tree is one of the most planted species in the world to produce natural rubber. Therefore, the quantification of evapotranspiration is important for the planning and management of these forests since it often represents the main outlet of precipitation in an area. The objective of the present work was to evaluate a monitoring system for estimating evapotranspiration based on the radiation balance in the rubber tree canopy with low-cost instrumentation. The experiment was conducted at the

Campo Unit of the Instituto Federal Baiano Valença campus, data were collected from 02/19/22 to 04/07/22. In one plant, evapotranspiration (ET) was estimated based on the canopy radiation balance with a CNR4 radiometer balance and with the proposed instrumentation. In the same plant, the sap flow (FS) was measured by the Heat Ratio method. The ET and FS results were compared with each other and with the atmospheric evaporative demand data. The expected uncertainty in the ET estimate was calculated as a function of the combination of measurement uncertainties. The mean ET found was 0.44 mmday^{-1} and the FS was 0.20 mmday^{-1} , the uncertainty in the estimate at ET was 0.91 mm. The monitoring system with low-cost instruments was able to estimate evapotranspiration based on the radiation balance in the rubber tree canopy, in addition to demonstrating better sensitivity to low transpiration rates when compared to the balance made by CNR4.

Keywords: liquid radiation, sap flow, embedded systems, Arduino, infrared thermometer

1. INTRODUÇÃO

Nativa do Brasil, a *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. é uma árvore de médio a grande porte. A exsudação de látex leitoso de sua casca faz da seringueira uma das espécies arbóreas mais plantadas no mundo com mais de 14 milhões de hectares para produção da borracha natural e seus derivados (MENDES et al., 1992; CUNHA & LOUREIRO, 2009; ARAUJO et al., 2015; PEREIRA et al., 2020; SECCO & BIGIO, 2020). A quantificação da evapotranspiração é importante para o planejamento e manejo dessas florestas uma vez que a mesma representa muitas vezes a principal saída da água precipitada em uma área (BALBINOT et al., 2008; GOTARDO et al., 2019; LING et al., 2022).

A lisimetria é considerada o método padrão para o monitoramento da evapotranspiração (VELLAME et al., 2012; MARTINS et al., 2017; DE CARVALHO et al., 2020), entretanto esta variável pode ser estimada pela medida da variação de armazenamento de água do solo (ZELEKE & WADE, 2012; UCAK et al., 2016; SHAHADHA et al., 2019) e por métodos micrometeorológicos. A Razão de Bowen Bowen (MACHADO et al., 2016; BUTTAR et al., 2018; SOUSA et al., 2021), Eddy Covariance (WHANG et al., 2015; ANAPALLI et al., 2018; MOORHEAD et al., 2019) e Temperatura do dossel (BARTHOLIC et al., 1970; HATFIELD et al., 1984; LUAN et al., 2021) são exemplos de métodos que se baseiam nas variáveis

micrometeorológicas.

Uma das grandes dificuldades no monitoramento da evapotranspiração é a representatividade espacial, se trata de um fenômeno de superfície e dada as condições particulares de cada lugar, torna-se um obstáculo a utilização de dados já existentes na literatura mesmo de lugares geograficamente e climatologicamente próximos. Imagens de satélite vem sendo para a estimativa da evapotranspiração de grandes áreas, entretanto, com longos intervalos de tempo entre as estimativas (ZHANG et al., 2016; LINS et al., 2017; ALCÂNTARA COSTA et al., 2021).

Com a utilização da termometria de infravermelho é possível o monitoramento da temperatura de várias plantas simultaneamente em áreas vegetadas ou em trechos específicos. O modelo de Bartholic et al. (1970) utiliza a temperatura do dossel para limitar o fluxo de calor latente à evapotranspiração potencial de uma superfície infinitamente úmida. Jackson et al (1981) e Hatfield et al. (1984) avaliando esse modelo observaram erros maiores em situações com cobertura parcial do dossel. Uma alternativa ao modelo de Bartholic et al (1970) é realizar o balanço de radiação na copa e desta forma estimar a evapotranspiração com base na medição da temperatura da copa de forma semelhante ao balanço de energia de uma folha como foi proposto por Gates (1968).

O monitoramento da evapotranspiração de forma contínua e em maiores números de pontos é necessário para a melhor representatividade espacial e temporal, mas sua viabilidade é reduzida diante do alto custo dos instrumentos convencionais. Daí, surge a necessidade da criação de sistemas alternativos de baixo custo de aquisição, para a popularização dessas tecnologias e maior cobertura e representatividade das áreas de interesse.

Porém, para medições mais confiáveis e acuradas, é de fundamental importância que haja a avaliação desses sistemas afim de identificar e minimizar as possíveis fontes de erros.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar um sistema de monitoramento para estimativa da evapotranspiração com base no balanço de radiação na copa da seringueira com instrumentação de baixo custo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo e instrumentação utilizada

A coleta de dados foi realizada entre 19/02/2022 e 07/04/2022 na Unidade Campo do Instituto Federal Baiano *campus* Valença (13°20'39.7"S; 39°07'35.9"W). Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo "Af" (tropical quente e úmido), com precipitação média anual de 2109 mm, temperatura média anual de 24,6 °C e, de acordo com Santos et al (2020), o solo presente na área experimental é o Latossolo Amarelo. No período de coleta de dados a Precipitação acumulada foi de 562 mm, com Temperatura do ar média de 21,9°C, a Evapotranspiração de Referência média de 6 mmdia⁻¹ (Figura 1) e Umidade do solo variou de 0,387 a 0,311 cm³cm⁻³.

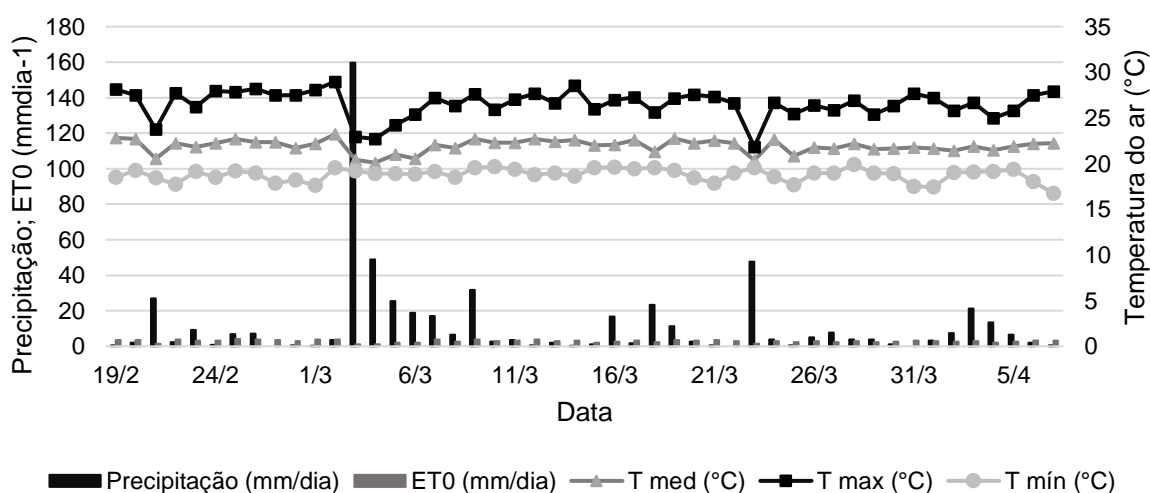


Figura 1. Precipitação, Evapotranspiração de Referência e Temperaturas máximas, médias e mínimas em escala diária

Na área estudada encontra-se um sistema agroflorestal de seringueira (*Hevea brasiliensis*), cacau (*Theobroma cacao*) e gliricídia (*Gliricidia sepium*). Os indivíduos da espécie utilizada neste trabalho foram plantados em fileira dupla no ano de 2015, o espaçamento dentro da fileira é de 3x2,5 metros. No preparo da área do consórcio foi realizado o preparo do solo, calagem e posteriormente tratamentos culturais e adubação, bem como controle de matocompetição.

O sistema proposto estima a evapotranspiração pelo balanço de radiação na copa com base na medição por instrumentos alternativos de cinco variáveis: radiação global, radiação transmitida pela copa, temperatura do ar, temperatura da copa e velocidade do vento. Na mesma planta foi medido o fluxo de seiva pelo método da Razão de Calor entre os dias 08/03/2022 e 07/04/2022 (Burgess et al., 2001).

Para a alocação da instrumentação uma torre de metal com 12m de altura foi

instalada ao lado da planta monitorada. Aproximadamente 1m acima da copa da seringueira foram posicionados o piranômetro alternativo, anemômetro, sensor de temperatura do ar, termômetro de infravermelho e o saldo radiômetro. Abaixo da copa foram instalados um piranômetro alternativo e um piranômetro convencional (LP02-Campbell Sci) (Figura 2). Na Tabela 1 encontram-se as variáveis monitoradas, os modelos dos instrumentos utilizados e suas respectivas acurácias.



Figura 2. Representação esquemática da alocação dos instrumentos de medição na seringueira (à esquerda) e a direita os instrumentos já instalados

Tabela 1. Variáveis monitoradas e seus respectivos instrumentos e acurácia

Variável	Instrumento de medição	Acurácia
Temperatura da copa	Termômetro de infravermelho MLX90614 (Melexis Microelectronic Systems)	0,02 °C
Radiação solar de ondas curtas incidente	CNR4 (Campbell Scientific)	<5%
Radiação solar de ondas curtas transmitida	Piranômetro alternativo (Benítez, 2021)	1,88 MJ.m ⁻² dia ⁻¹
Radiação solar de ondas curtas refletida	LP02 (Campbell Scientific)	4%
Radiação de ondas longas incidente	Piranômetro alternativo (Benítez, 2021)	1,88 MJ.m ⁻² dia ⁻¹
Radiação de ondas longas emitida	CNR4 (Campbell Scientific)	<5%
Temperatura do ar	CNR4 (Campbell Scientific)	<5%
Velocidade do vento	LM35 (Texas Instruments)	0,75°C
	Anemômetro Arduino (Usinainfo)	2%

No sistema proposto, a radiação solar global foi medida por meio de piranômetros montados com o fotodiodo do modelo BPV10NF (VISHAY, 2021) como elemento sensível à radiação solar. O fotodiodo foi protegido por um filtro de PVC (plug de 1/2") para atenuar a radiação solar incidente sobre o sensor, a fim de que não ocorresse saturação da corrente elétrica produzida em ocasiões de radiações de alta intensidade. A radiação solar transmitida pela copa foi medida também por um piranômetro alternativo do mesmo modelo instalado abaixo da copa. Estes sensores foram calibrados ao longo do período de medição tomando como padrão instrumentos convencionais (LP02 e CNR4).

Para a medição da temperatura do ar, utilizou-se o dispositivo alternativo LM35 que retorna uma tensão de saída linearmente proporcional a temperatura em graus celsius, não necessita de calibração externa e possui precisão de 0,75°C na faixa de -55°C a 150°C (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

No monitoramento da temperatura da copa foi utilizado um sensor de infravermelho modelo MLX90614. Nesse sensor tanto o chip detector da termopilha sensível ao infravermelho quanto os circuitos condicionadores de sinal estão integrados no mesmo invólucro TO-39. São integrados no sensor um amplificador de baixo ruído, conversor analógico para digital de 17 bits e uma unidade de processamento de dados (MELEXIS, 2019). A temperatura medida apresenta uma resolução de 0,02 °C. A visada (field of view) do sensor é de 90° dessa forma, com o sensor instalado acima 1 m da copa, a área é de 3,14 m².

O anemômetro utilizado é do tipo de canecas capaz de realizar leituras da velocidade do vento de até 33,33 m/s. Tanto a medida do número de voltas no anemômetro e do movimento das básculas do pluviômetro é feita por meio de um sensor reed switch (USINAINFO, 2021).

A aquisição de dados foi realizada por um circuito eletrônico composto por uma placa Arduino Mega, que registra os valores medidos além da data e hora em um cartão de memória. Os sensores com saída digital podem ser lidos diretamente pela placa Arduino. Para a leitura do sinal analógico do sensor de radiação, utilizou-se o conversor Analógico/Digital HX711 de 23 bits (resolução de 1,2 10-5%).

O sistema proposto foi comparado com um piranômetro e um saldo radiômetro convencional. O CNR4 é um saldo radiômetro que mede o balanço de energia entre a radiação de entrada e de saída. Consiste em um par de piranômetros, um voltado para cima, a outro voltado para baixo, para a medição da radiação solar de ondas

curtas e um par de pirgeômetros em configuração semelhante que mede a radiação infravermelha distante de onda longa. Todos os quatro sensores são integrados diretamente no corpo do instrumento, em vez de módulos separados montados na caixa. Cada sensor é calibrado individualmente para precisão ideal (CAMPBELL SCI, 2019). O LP02 é um piranômetro Classe C (segunda classe) com sensor de termopilha que monitora a radiação solar para toda a faixa do espectro solar e permite a calibração de outros piranômetros a partir dele, em razão de sua sensibilidade espectral plana, o LP02 pode ser posicionado sob copas de plantas para medições de radiação solar transmitida (CAMPBELL SCI, 2020).

2.2. Evapotranspiração e balanço de radiação na copa

O método aplicado por Vellame et al., (2022) (Figura 3), tem como premissa a estimativa da evapotranspiração com base no balanço de radiação da copa e das trocas de calor na folha. Desconsiderando-se a pequena fração de radiação utilizada nos processos metabólicos, é possível aplicar o balanço proposto por Gates (1968) para toda a copa e a partir dele, estimar-se a transpiração do vegetal (LE) (Equação 1).

$$LE = Q - R - C \quad (1)$$

Em que:

Q: radiação de ondas curtas e ondas longas absorvida pelo dossel;

R: radiação de ondas longas emitida pelo dossel;

C: radiação trocada com o ar por condução-convecção.

O dossel absorve energia solar radiante de ondas curtas ($q_s - W m^{-2}$) e de ondas longas ($q_l - W m^{-2}$) (Equação 2).

$$Q = q_s + q_l \quad (2)$$

A radiação terrestre (ondas longas) é absorvida pelas folhas de acordo com sua absortividade para ondas longas nas duas faces das folhas. A radiação terrestre pode ser calculada em função da temperatura do ar de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann. Pela Lei de Kirchhoff a emissividade e absortividade de uma superfície para um determinado comprimento de onda são iguais. Considerando que a maioria das superfícies terrestres possui uma emissividade para ondas longas alta, em torno de 0,96, pode-se calcular a energia absorvida pela radiação de ondas longas pela Equação 3.

$$q_L = 2 \varepsilon^2 \sigma T_{ar}^4 \quad (3)$$

Em que:

ε : emissividade para ondas longas do ambiente;

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($W m^{-2} K^{-4}$);

T_{ar} : temperatura do ar (K)

Da radiação de ondas curtas incidente no dossel, parte é refletida, parte é transmitida e parte é interceptada pelo dossel. A energia de ondas curtas absorvida de ondas curtas pelo dossel ($q_S - W m^{-2}$) foi calculada pela Equação 6 utilizando-se o albedo (Equação 5) e eficiência de interceptação (Equação 4).

$$E = \frac{R_g - R_t}{R_g} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{R_r}{R_g} \quad (5)$$

$$q_S = (E - \alpha) R_g \quad (6)$$

Em que:

E: eficiência de interceptação;

α : albedo;

R_g : radiação global de ondas curtas ($W m^{-2}$);

R_t : radiação transmitida ao solo ($W m^{-2}$);

R_r : radiação refletida ($W m^{-2}$).

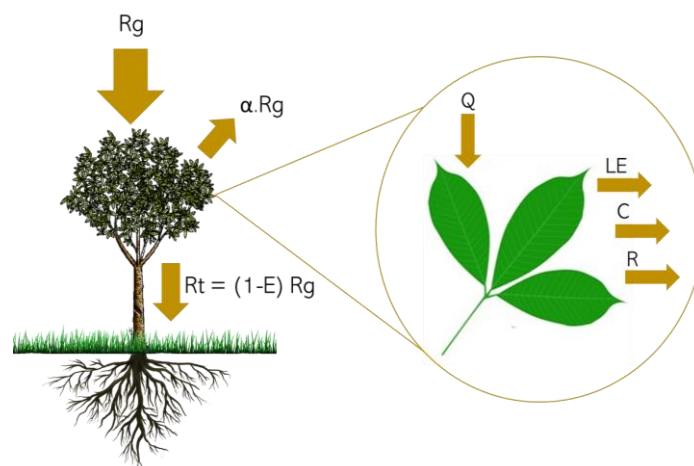


Figura 3. Balanço de radiação na copa e na folha indicando a radiação global de ondas curtas (R_g), a radiação transmitida ao solo (R_t), a radiação refletida ($\alpha \cdot R_g$) sob o efeito do albedo (α) e a eficiência de interceptação (E).

A radiação de ondas longa é emitida pelos dois lados das folhas, esta foi

calculada em função da temperatura do dossel de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann pela Equação 7.

$$R = 2 \varepsilon \sigma T_d^4 \quad (7)$$

Em que:

ε : emissividade para ondas longas do ambiente;

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($W m^{-2} K^{-4}$);

T_d : temperatura da copa (K)

A densidade de fluxo de energia entre o dossel e ar pelo processo de convecção-condução foi calculada pela Equação 8.

$$C = K_{ar} \frac{T_d - T_{ar}}{d} \quad (8)$$

Em que:

K_{ar} : condutividade convectiva-condutiva do ar ($0,0259 W m K^{-1}$);

d : distância da camada limite (m).

A camada limite é a camada de transição de temperatura ao redor da folha. A espessura desta depende do tamanho e do formato das folhas, além da velocidade do vento, e pode ser estimada pela expressão empírica apresentada na Equação 9.

$$d = K_f \sqrt{\frac{w}{u}} \quad (9)$$

Em que:

K_f : parâmetro empírico do formato da folha ($0,005 m s^{-0,5}$);

w : largura da folha (m);

u : velocidade do vento ($m s^{-1}$).

2.3. Fluxo de seiva

O sensor de fluxo de pulso de calor é composto por duas sondas para medição de temperatura e uma sonda aquecedora. Nas sondas de medição de temperatura são utilizados termopares de cobre-constantan, de 0,5 mm de diâmetro, inseridos em agulhas hipodérmicas de 1 mm de diâmetro interno e 2 cm de comprimento. A sonda de aquecimento é composta por uma agulha hipodérmica de 0,8 mm de diâmetro interno, também de 2 cm de comprimento, revestida por fio de constantan, o qual eleva de temperatura por meio de um pulso elétrico enviado.

Para o cálculo do fluxo de seiva utilizou-se a metodologia proposta por Burgess et

al. (2001). A partir da velocidade do pulso, determina-se a velocidade do pulso corrigida em uma dada área do xilema, medindo-se frações de seiva e madeira e contabilizando suas diferentes densidades e capacidades específicas de calor, de acordo com a Equação 11. Para corrigir o desalinhamento da sonda, considera-se que uma das sondas de temperatura está inserida simetricamente (6 mm) ao aquecedor e o espaçamento segunda calcula-se utilizando a Equação 10. As medições são feitas 80 segundos após a aplicação de um pulso de calor de 2,15 W por 10 s. O valor de β a ser utilizado é de 1,723, valor recomendado por Burgess et al. (2001).

$$x_2 = \sqrt{4 K t \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) + x_1^2} \quad (10)$$

Em que,

x_2 : Espaçamento considerado incorreto (cm);

x_1 : Espaçamento considerado correto (cm);

K: Difusividade térmica da madeira ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$);

v_1, v_2 : aumentos de temperaturas nas sondas acima e abaixo do aquecedor em determinado tempo de medição;

t: Tempo de medição (s).

$$V_c = \frac{4 K \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) - x_2^2 + x_1^2}{2 t (x_1 - x_2)} \times \beta \times 3600 \quad (11)$$

Em que:

V_c : velocidade do pulso de calor corrigida (cm h^{-1});

K: difusividade térmica do caule ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$);

x_1, x_2 : espaçamentos corrigidos dos sensores em relação ao aquecedor (cm);

v_1, v_2 : aumentos de temperaturas nas sondas acima e abaixo do aquecedor em determinado tempo de medição;

t: tempo de medição (s);

β : coeficiente empírico em função do diâmetro da ferida adimensional.

A densidade de fluxo de seiva foi determinada em função da velocidade do pulso corrigida (Equação 12) e o fluxo volumétrico, calculado pelo produto da velocidade da seiva e área de seção transversal do xilema (Equação 13).

$$d_{FS} = \frac{V_c \rho_b (c_w + m_c c_s)}{\rho_s c_s} \quad (12)$$

Em que:

- dFS: densidade de fluxo de seiva (cm h⁻¹);
 Vc: velocidade do pulso de calor corrigida (cm h⁻¹);
 pb: densidade da madeira (kg cm⁻³);
 cw: calor específico da matriz da madeira (1200 J.kg⁻¹ °C⁻¹);
 cs: calor específico da seiva (4182 J.kg⁻¹ °C⁻¹);
 mc: teor de água no alburno;
 ps: densidade da água (kg cm⁻³).

$$FS = V_s A_s \quad (13)$$

Em que:

- FS: fluxo de seiva (cm³.h⁻¹)
 Vs: velocidade da seiva (cm.h⁻¹);
 As: área da seção do xilema (cm²).

Para determinação da difusividade térmica e outras características térmicas do caule também será utilizado-se a metodologia proposta por Burgess et al. (2001). Foi coletado um disco do caule da seringueira, em seguida a amostra foi imersa em água para a saturação do tecido e verificado o volume da seção. Posteriormente o disco foi levado a estufa a 103°±2 onde permaneceu até atingir peso constante para determinação da massa seca. De posse desses dados determinou-se a densidade básica (pb) e aparente (pa) da madeira, condutividade térmica da madeira fresca (Kgw) e o calor específico da madeira fresca (C) (Equações 14 a 18). Para tanto foi necessário calcular a condutividade térmica da madeira seca pela Equação 19.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad (14)$$

Em que:

- pb: densidade básica (Kg m⁻³);
 ms: massa seca (g);
 V: volume verde (m³).

$$\rho_a = \rho_b + TU \quad (15)$$

Em que:

ρ_a : densidade aparente (Kg m^{-3});

ρ_b : densidade básica (Kg m^{-3});

TU: teor de umidade.

$$m_c = \frac{TU}{\rho_b} \quad (16)$$

Em que:

m_c : teor de água no alburno;

TU: teor de umidade;

ρ_b : densidade básica (Kg m^{-3}).

$$K_{gw} = K_s m_c \frac{\rho_b}{\rho_s} + K_w \left(1 - m_c \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) \quad (17)$$

Em que:

K_{gw} : Condutividade térmica da madeira fresca ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

K_s : Condutividade térmica da água ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

K_w : Condutividade térmica da madeira seca ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

m_c : Umidade do alburno;

ρ_b : Densidade da madeira (Kg m^{-3});

ρ_s : Densidade da seiva (Kg m^{-3}).

$$C = \frac{\rho_a}{\rho_b} \times C_w + \frac{TU \times \rho_s}{\rho_a} \times C_s \quad (18)$$

Em que:

C: calor específico ($\text{J Kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

ρ_a : densidade aparente (Kg m^{-3});

ρ_b : densidade básica (Kg m^{-3});

ρ_s : densidade da água a 25°C (1000 Kg m^{-3})

TU: teor de umidade (%);

C_w : calor específico da madeira ($1200 \text{ J Kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

C_s : calor específico da seiva ($4182 \text{ J Kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

$$K_w = 0,04182 (21 - 20 F_v) \quad (19)$$

Em que:

K_w : Condutividade térmica da madeira seca ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

Fv: Fração do xilema.

$$F_v = 1 - \left(\frac{\rho_b \cdot 0,06536 + m_c}{1000} \right) \quad (20)$$

Em que:

Fv: Fração do xilema;

ρ_b : Densidade da madeira (Kg m^{-3});

m_c : Umidade do alburno.

A difusividade térmica foi determinada pela Equação 21.

$$K = \frac{K_{gw}}{\rho \cdot c} \cdot 10000 \quad (21)$$

Em que,

K: Difusividade térmica ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$);

K_{gw} : Condutividade térmica da madeira fresca ($\text{J m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

ρ : Densidade da madeira fresca (Kg m^{-3});

c: Calor específico da madeira fresca ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

2.4. Análise dos dados

Foi realizada a análise de regressão e probabilidade de ocorrência de desvio entre as medidas dos instrumentos convencionais e os propostos para: albedo (α), Radiação solar global de ondas curtas (R_g), Radiação solar de ondas curtas transmitida pela copa (R_t), Radiação solar de ondas longas absorvida pela copa (q_L), Radiação solar de ondas longas emitida pela copa (R) e para a Evapotranspiração (ET).

Calculou-se a incerteza esperada na estimativa da ET em função da combinação das incertezas de medição. Como as variáveis de entrada são independentes, foi utilizada a Equação 22, que melhor combina os efeitos dos erros de medição

$$U_c = \sqrt{\sum |S_{y|x}|_x \cdot u_x^2} \quad (22)$$

Em que:

U_c : incerteza combinada;

u_x : incerteza na medição da variável i ;

S_y é o coeficiente de sensibilidade para a variável i .

O coeficiente de sensibilidade (S_y) foi estimado pela Equação 23 para variação de x em função das incertezas, tendo como base os dados medidos em campo, como mostrado na Equação 24.

$$S_y = \frac{\Delta y/y_0}{\Delta x/x_0} \quad (23)$$

$$\Delta X = x_0 \pm u_x x_0 \quad (24)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação da instrumentação

Observou-se variações da Eficiência de interceptação da radiação solar (E) e do Albedo (α) em escala horária que não são condizentes com mudanças na reflectância e transmitância da copa, mas sim do posicionamento dos sensores em relação aos raios solares (Figura 4). Dessa forma, utilizou-se o valor médio das 11h às 13h para todos os horários de cada dia tanto para o α quanto para a E . Procedimento semelhante foi empregado por Guardiola-Claramonte et al (2010) e Pilau & Angelocci (2016) que utilizaram os dados das 10:00 às 14:00 horas.

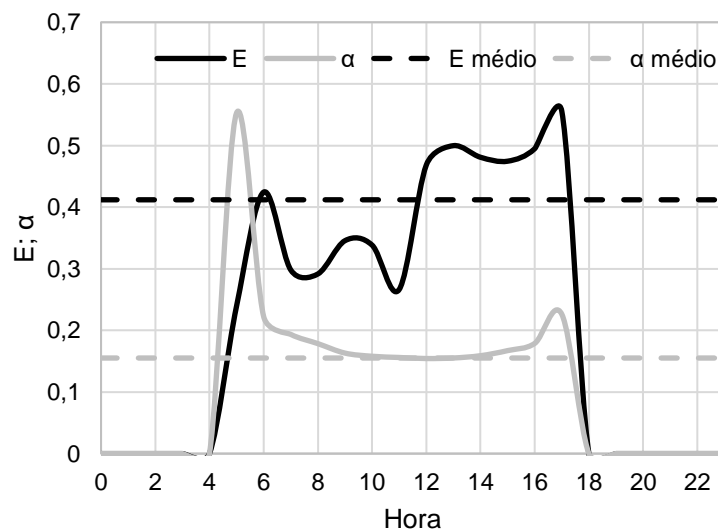


Figura 4. Variação da Eficiência de interceptação da radiação solar (E) e do albedo (α) no período de um dia, as linhas tracejadas representam os valores médios calculados a partir do intervalo de 11:00 às 13:00 horas

Durante o período de observação do presente trabalho, o valor médio de albedo foi de 0,16, variando de 0,15 a 0,17. Para seringaís a média do α é de 0,15 (Tabela 2). Já as médias da Eficiência de interceptação, variaram de 0,60 no início a 0,19 no

final das medições, notando-se queda nos valores em cerca de 65%. Isso pode ser explicado pela redução da área foliar (AF) na copa fato comum na seringueira já que se trata de uma espécie decídua (Figura 5). Os resultados encontrados corroboram com o estudo de Takashi et al., (1989), demonstrando a importância em se monitorar a eficiência de interceptação da radiação solar, variável que possui relação direta com a área foliar da planta (Tabela 2).

A área foliar é afetada por fatores bióticos e abióticos e está intimamente ligada a evapotranspiração. O albedo por ser uma propriedade de superfície, não varia de forma tão acentuada quanto a eficiência de interceptação em função de mudanças na AF. Na Tabela 2 estão apresentados os valores de albedo e eficiência de interceptação encontrados para diferentes espécies e situações de superfície vegetada. Nota-se que mesmo em condições diversas de coberturas vegetais o albedo não varia de forma expressiva.

Ao estimar a evapotranspiração com o valor de albedo médio da seringueira encontrado na literatura (0,145) o erro na evapotranspiração é de 0,152 mm (Figura 6).

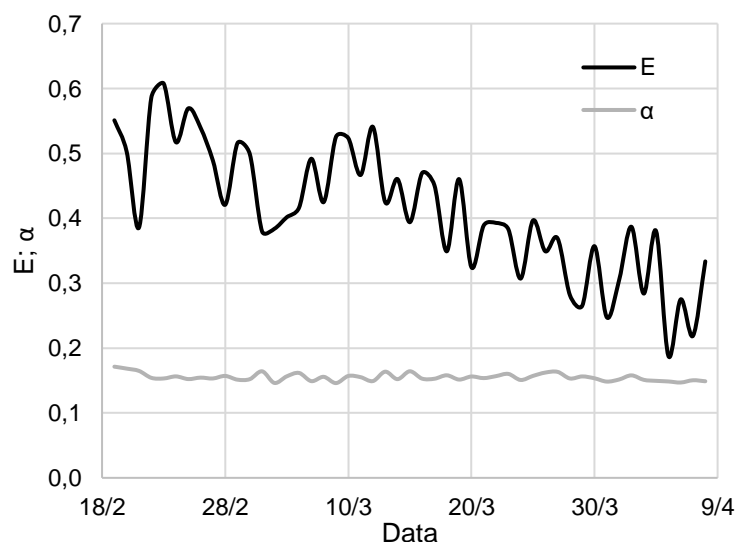


Figura 5. Variação da Eficiência de interceptação (E) da radiação solar e do albedo (α) ao longo do período monitorado

Tabela 2 - Albedo (α) e Eficiência de interceptação da radiação solar (E) de diferentes espécies e tipos de cobertura vegetal.

Referências	Tipo de cobertura	α
SHUTTLEWORTH (1984)	Floresta tropical	0,12
TAKAHASHI et al (1990)	Seringal com AF baixa	0,10
	Seringal com AF alta	0,16

BASTOS (2000)	Vegetação secundária (0,5 ano)	0,17
	Vegetação secundária (1 ano)	0,16
	Vegetação secundária (2 anos)	0,16
	Vegetação secundária (10 anos)	0,14
GUARDIOLA-CLARAMONTE (2010)	Seringal com AF baixa	0,12
	Seringal com AF alta	0,20
CARDOZO et al (2014)	Vegetação arbórea	0,22
	Vegetação em regeneração	0,16
Referências	Espécie	E
TAKAHASHI et al (1990)	<i>Hevea brasiliensis</i> com AF baixa	0,25
	<i>Hevea brasiliensis</i> com AF alta	0,46
BARTELINK (1998)	<i>Pinus</i> sp com AF baixa	0,01
	<i>Pinus</i> sp com AF alta	0,96
LIAKATAS et al (2002)	<i>Quercus frainetto</i> com AF baixa	0,45
	<i>Quercus frainetto</i> com AF alta	0,85
PILAU & ANGELOCCI (2015)	<i>Citrus sinensis</i> com AF baixa	0,52
	<i>Citrus sinensis</i> com AF alta	0,84
PILAU & ANGELOCCI (2016)	<i>Coffea arabica</i> com AF baixa	0,30
	<i>Coffea arabica</i> com AF alta	0,80

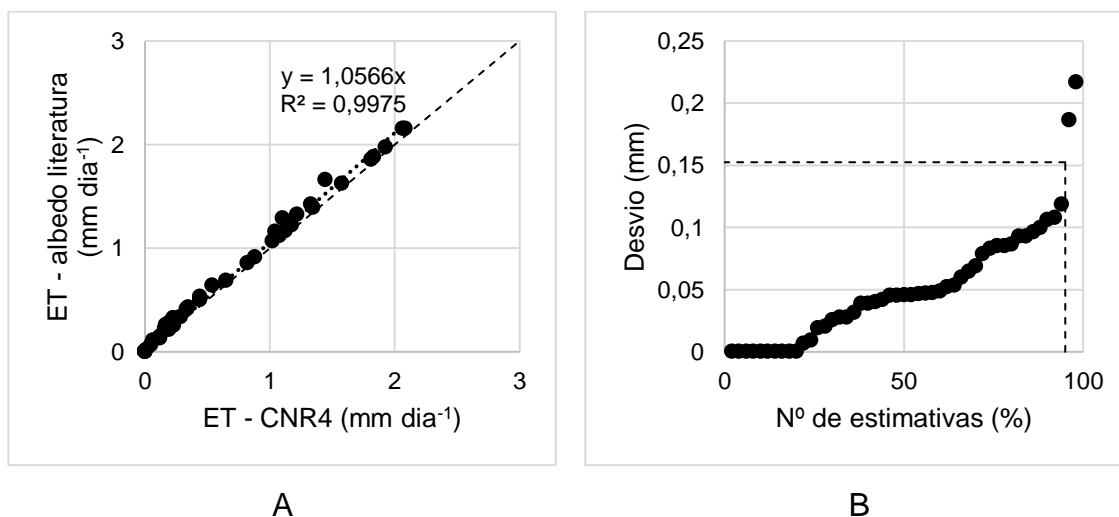
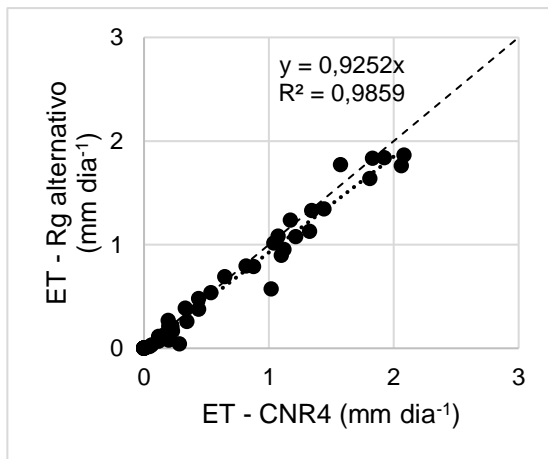
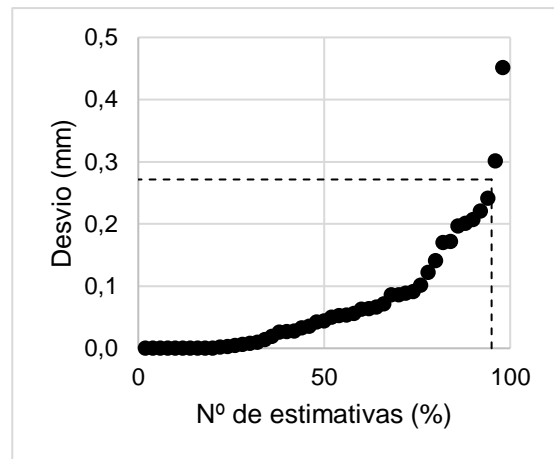


Figura 6. Relação entre ET estimada pelo saldo radiômetro com a ET estimada utilizando albedo da literatura (A) e seus respectivos desvios (B).

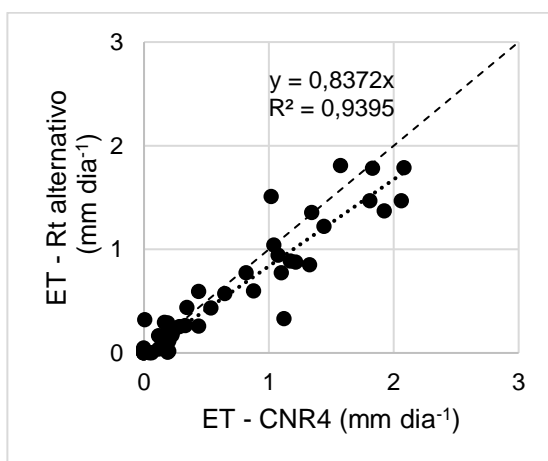
Utilizando a radiação global medida pelo piranômetro alternativo e mantendo os demais componentes medidos pelo CNR4, o erro foi de 0,271 mm (Figura 7 A e B). Já utilizando o piranômetro alternativo na medição da radiação de ondas curtas transmitida pela copa, o erro apresentado foi de 0,575 mm (Figura 7 C e D).



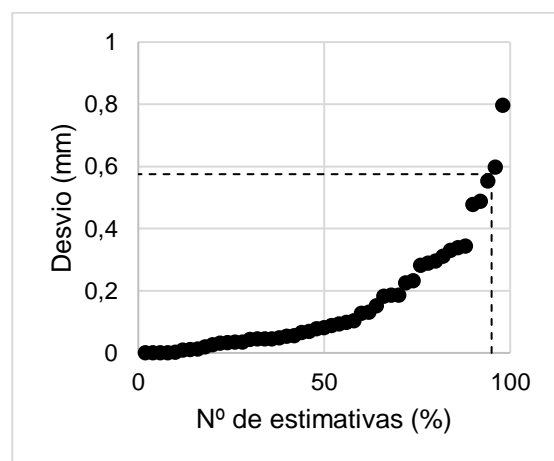
A



B



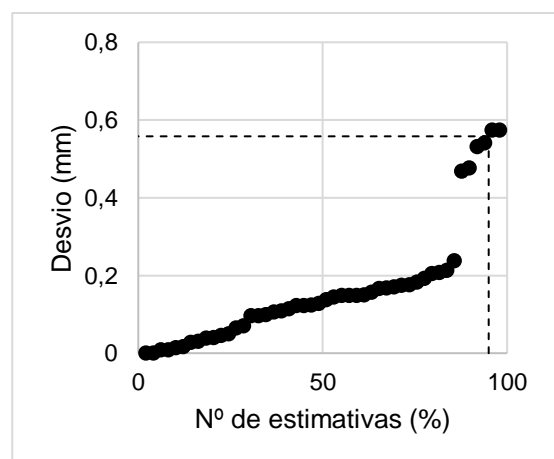
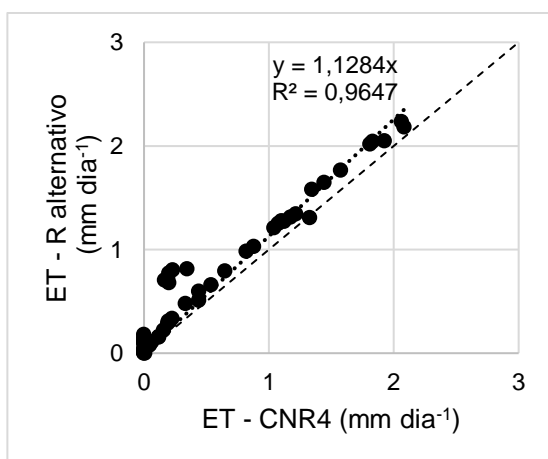
C



D

Figura 7. Relação entre ET estimada pelo saldo radiômetro com a ET estimada utilizando (A) Radiação global medida com piranometro alternativo (Rg), (C) Radiação de ondas curtas transmitida pela copa medida por piranômetro alternativo (Rt) e seus respectivos desvios (B, D).

Com relação a radiação de ondas longas, na radiação emitida estimada pela temperatura da copa o erro foi de 0,558 mm (Figura 8 A e B) e na radiação absorvida calculada pela temperatura do ar foi de 0,294 mm (Figura 8 C e D).



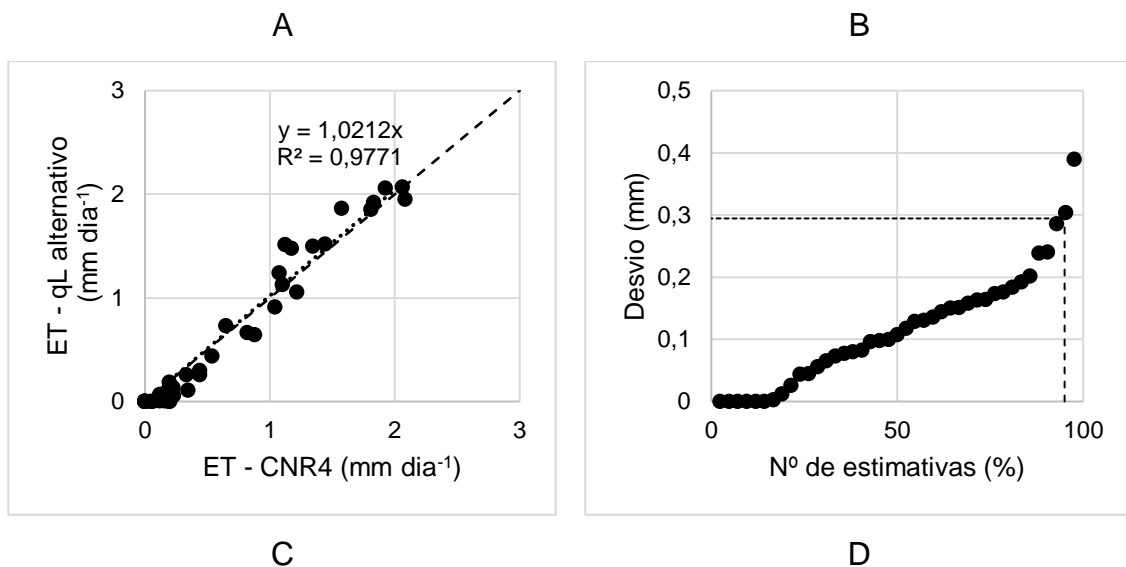


Figura 8. Relação entre ET estimada pelo saldo radiômetro com a ET estimada utilizando (A) Radiação de ondas longas emitida pela copa (R), (C) Radiação de ondas longas absorvida pela copa (qL) e seus respectivos desvios (B, D).

Após analisar as variáveis de entrada de forma individual, estimou-se a relação entre a ET utilizando a instrumentação alternativa e a ET estimada pelo CNR4 e com isso observou-se que em 95% das estimativas, o erro esperado é inferior a 0,727 mm (Figura 9). Consideramos essa incerteza aceitável tendo em vista que Allen et al (2011) indicam uma incerteza de até 15% (0,75 mm para uma ET de 5 mm) na estimativa da evapotranspiração por lisímetro de pesagem. Erros no fechamento do balanço de energia em torno de 20% (1 mm para uma ET de 5 mm) foram reportados Wilson et al. (2002) em uma ampla avaliação do fechamento do balanço de energia com uma rede de medição de fluxos de carbono e energia, por um longo prazo, em ecossistemas e climas contrastantes.

A incerteza observada no presente estudo apresenta um valor alto em relação ao medido. Durante o período de monitoramento dada a baixa capacidade de estimativa utilizando o CNR4 em fluxos pequenos, o valor de ET foi estimado em zero por alguns dias. O mesmo não ocorreu nas estimativas utilizando instrumentação alternativa, indicando que o método consegue acompanhar baixos fluxos transpiratórios (Figura 10). Essa diferença de leitura entre o CNR4 e o método alternativo nos dias de baixa transpiração foi convertida em erro, o que acarretou em erro percentual expressivo.

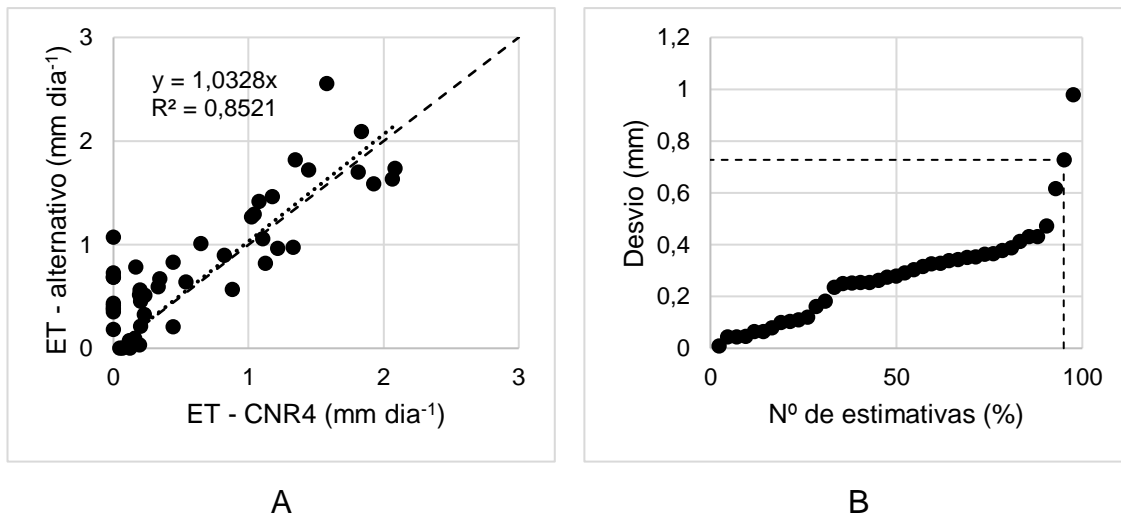


Figura 9. Relação entre ET estimada pelo saldo radiômetro com a ET estimada utilizando o sistema proposto (A) e seus respectivos desvios (B).

Ao utilizar um albedo fixo, medindo-se a temperatura da copa e a radiação solar global e transmitida a incerteza esperada em função da sensibilidade e incertezas dos parâmetros de entrada é de 0,91mm. As maiores fontes de incerteza foram a medida da radiação de ondas curtas transmitida e a radiação de ondas longas absorvida pela copa (Equação 3). Para reduzir esses erros sugere-se que em situações de copas esparsas onde ocorrem grandes variações diárias na radiação transmitida (Figura 4), aumente-se o número de sensores horizontalmente e em alturas mais próximas a copa para diminuir o efeito da radiação difusa. A fim de minimizar os erros aleatórios na medição da radiação de ondas longas, recomenda-se também o aumento do número de sensores, para aumentar a representatividade da área medida, uma vez que a copa se movimenta com a ação do vento

Tabela 3 - Incerteza e sensibilidade dos parâmetros de entrada na equação de estimativa da ET

Variável	Sy	I (mm)
Albedo	1,2	0,15
Radiação global	2,4	0,27
Radiação transmitida	10,2	0,57
Radiação de ondas longas absorvida pela copa (Equação 3)	21,9	0,56
Radiação de ondas longas emitida pela copa (Equação 7)	42,0	0,29
Evapotranspiração		0,91

3.2. Monitoramento da evapotranspiração e fluxo de seiva

A média da ET durante o período de avaliação foi de 0,44 mmdia⁻¹, entretanto na Figura 9 pode-se observar dois períodos distintos. No início das medições (19/02

a 19/03) a transpiração apresentou maiores taxas, chegando a $1,9 \text{ mmdia}^{-1}$ e ao final da medição com transpiração nula (20/03 a 07/04). Tan et al (2011) reporta uma ET média de $3,08 \text{ mmdia}^{-1}$ nas suas observações. Giambelluca et al (2016) estudando dois seringais encontrou valores de ET de 0,9 e $4,1 \text{ mmdia}^{-1}$ para o período de senescência e de 2,4 e 4,8 para a época de expansão foliar, na Tailândia e no Camboja respectivamente. Ruairén et al (2021) apresentou valores mais altos para a ET, sendo $5,53 \text{ mmdia}^{-1}$ para o período de desfolha e 7,35 para o estágio vegetativo da seringueira.

Com relação a fração de radiação líquida utilizada para transpiração (ET/Rn), a média para o período foi de 0,06, com máximo de 0,28 e mínimo de 0. Isso evidencia mais uma vez que uma pequena parte da radiação solar está sendo convertida em evapotranspiração. Takahasi et al (1990) encontraram valores de ET/Rn entre 0,24 e 0,59, Giambelluca et al (2016) relataram 0,722 para o plantio na Tailândia e 0,745 no Camboja, Tan et al (2011) de 0,709 e Ruairén et al (2021) de 0,28 a 0,60, contrastando com os resultados encontrados no presente estudo.

O fluxo de seiva variou de 0,43 a 0 mmdia^{-1} com valor médio de $0,20 \text{ mmdia}^{-1}$, não alterando expressivamente ao longo do período de monitoramento. Isarangkool Na Ayutthaya et al (2010) utilizando o método de dissipação térmica encontraram valores de transpiração para a seringueira na ordem de $1,6 \text{ mmdia}^{-1}$ no período vegetativo e de $0,4 \text{ mmdia}^{-1}$ após a queda das folhas. Resultado semelhante foi apresentado por Sopharat et al (2015), onde o valor mínimo de transpiração foi $0,1 \text{ mmdia}^{-1}$ e máximo de $2,2 \text{ mmdia}^{-1}$ para os períodos de senescência e retomada foliar, respectivamente. Annamalainathan et al (2013) determinaram o consumo hídrico para a seringueira na Índia chegando a 40 Ldia^{-1} no período de copa densa e variação de 5,5 a 14 Ldia^{-1} no período sem folhas. A planta monitorada neste estudo apresentou um fluxo de seiva pequeno e constante. Considerando que o processo de transpiração durante o período de monitoramento foi baixo, torna-se necessário o monitoramento durante um maior intervalo de tempo afim de monitorar a transpiração e fluxo de seiva em diferentes condições de demanda evaporativa da atmosfera e de conteúdo de água no solo.

De maneira geral os valores de fluxo de seiva e ET foram baixos quando comparados ao encontrado na literatura. Existe queda observada na eficiência de interceptação, entretanto a ET diminuiu de forma abrupta, provavelmente ocasionada pelo início da fase de senescência. Observou-se no mês de março a mudança visual

na coloração das folhas para tons amarelados e avermelhados e em abril o início de um desfolhamento que seguiu até o fim do período de monitoramento. Esse estágio é definido por Moraes (1982) como senescência da seringueira, período de envelhecimento natural das folhas e perda de funcionalidade das mesmas, justificando assim a redução da atividade fisiológica da planta e por consequência a sua transpiração.

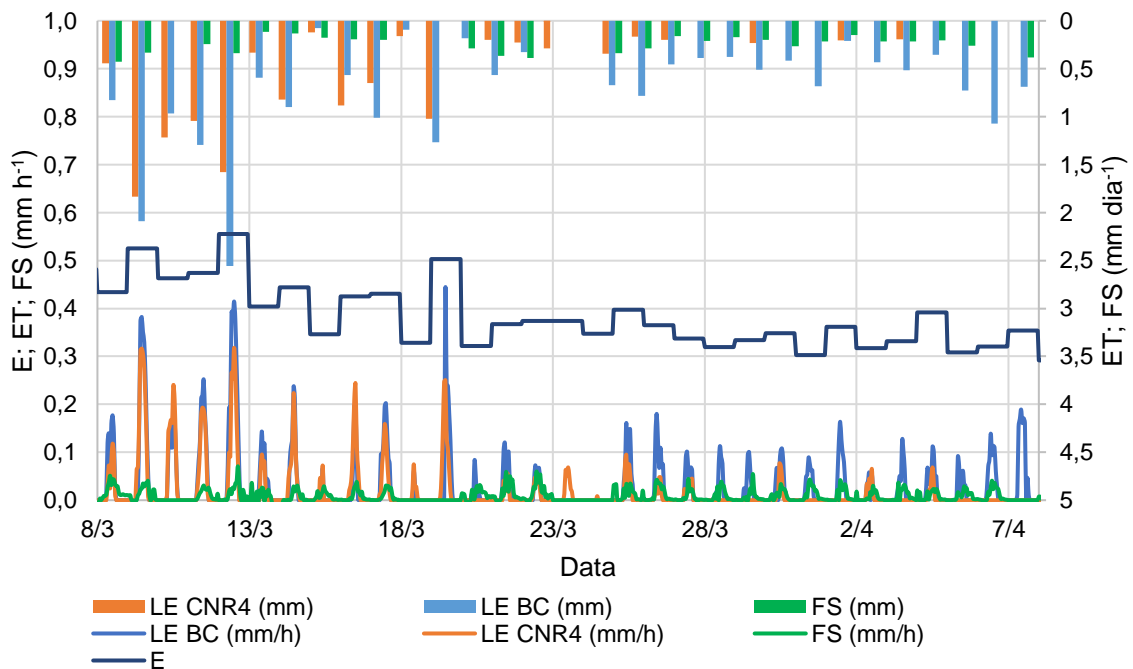


Figura 10. Eficiência de interceptação da radiação solar pela copa (E), Evapotranspiração (ET) e Fluxo de seiva (FS) em escala horária e diária

4. CONCLUSÕES

O sistema de monitoramento com instrumentos alternativos foi capaz de estimar a evapotranspiração com base no balanço de radiação na copa da seringueira, além de demonstrar melhor sensibilidade as baixas taxas de transpiração quando comparado ao balanço de radiação utilizando o CNR4.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA COSTA, J., NAVARRO-HEVIA, J., COSTA, C. A. G., DE ARAÚJO, J. C. Temporal dynamics of evapotranspiration in semiarid native forests in Brazil and Spain using remote sensing. **Hydrological Processes**, v. 35, n. 3, p. e14070, 2021.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., HOWELL, T. A., & JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n.6, p. 899-920, 2011.

ANAPALLI, S. S., FISHER, D. K., REDDY, K. N., WAGLE, P., GOWDA, P. H., SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 228-239, 2018.

ANNAMALAINATHAN, K., JOSEPH, J., ALAM, B., SATHEESH, P. R., JACOB, J.. Seasonal changes in xylem sap flow rate in mature rubber plants. **J. Plant Crop**, v. 41, n. 3, p. 343-349, 2013.

ARAÚJO, A., DE CASTRO, A., VENTURA DE ARAÚJO, L., RAMOS, R., & MELÉNDEZ, R. Análise financeira do sistema agroflorestal cacauzeiro com seringueira na mesorregião sul baiano. **Agrotropica (Brasil)**, v. 27, n. 1, p. 15-18, 2015.

BALBINOT, R., DE OLIVEIRA, N. K., VANZETTO, S. C., PEDROSO, K., & VALÉRIO, Á. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas The forest role in the hydrological cycle at hydrological basins. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2008.

BARTELINK, H. H. Radiation interception by forest trees: a simulation study on effects of stand density and foliage clustering on absorption and transmission. **Ecological modelling**, v. 105, n. 2-3, p. 213-225, 1998.

BARTHOLIC, J. F., NAMKEN, L. N., WIEGAND, C. L. Combination equations used to calculate evaporation and potential evaporation. **Combination equations used to calculate evaporation and potential evaporation.**, n. 41-170, 1970.

BASTOS, T. X. (2000). Balanço de água e de radiação solar em áreas desmatadas para fins agrícola, na Amazônia Oriental. In: **CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL SOBRE FLORESTAS**, 6., 2000, Porto Seguro. Resumos técnicos. Rio de Janeiro: Instituto Ambiental Biosfera, 2000.

BENÍTEZ, J. S.. Sensores de baixo custo para monitoramento contínuo da umidade do solo e radiação solar. Orientador: Lucas Melo Vellame. 2021. 53. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Núcleo de Engenharia da Água e do Solo, Cruz das Almas, 2021.

BURGESS, S. S., ADAMS, M. A., TURNER, N. C., BEVERLY, C. R., ONG, C. K., KHAN, A. A., BLEBY, T. M. 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.

BUTTAR, N. A., YONGGUANG, H., SHABBIR, A., LAKHIAR, I. A., ULLAH, I., ALI, A., ... & YASIN, M. A. Estimation of evapotranspiration using Bowen ratio method. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 17, p. 807-810, 2018.

CAMPBELL SCIENTIFIC. Product Manual: CNR4 Net Radiometer. Shepshed, 2019. 52 p.

CAMPBELL SCIENTIFIC. Product Manual: LP02. Shepshed, 2020. 30 p.

CARDOZO, F. D. S., PEREIRA, G., SHIMABUKURO, Y. E., MORAES, E. C. Análise das mudanças dos parâmetros físicos da superfície derivados das queimadas no estado de Rondônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, p. 830-854, 2014.

CUNHA, C. C.; LOUREIRO, C. F. B. Reservas extrativistas: limites e contradições de uma territorialidade seringueira. **Theomai**, n. 20, p. 169-185, 2009

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

DE CARVALHO, R. C., MOTA, F. D., GABRIEL FILHO, L. R. A., KLAR, A. E., GRASSI FILHO, H. Lisímetro para medida da evapotranspiração na cultura do pimentão em sistema hidropônico com substrato1. **IRRIGA**, v. 25, n. 2, p. 361-376, 2020.

GATES, D. M. Transpiration and leaf temperature. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 19, n. 1, p. 211-238, 1968.

GIAMBELLUCA, T. W., MUDD, R. G., LIU, W., ZIEGLER, A. D., KOBAYASHI, N., KUMAGAI, T. O., ... & KASEMSAP, P. Evapotranspiration of rubber (*Hevea brasiliensis*) cultivated at two plantation sites in Southeast Asia. **Water Resources Research**, v. 52, n. 2, p. 660-679, 2016.

GOTARDO, R., PINHEIRO, A., PIAZZA, G. A., KAUFMANN, V., TORRES, E. Comparação entre variáveis microclimáticas de local aberto e florestal em um bioma da Mata Atlântica, sul do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1415-1427, 2019.

GUARDIOLA-CLARAMONTE, M., TROCH, P. A., ZIEGLER, A. D., GIAMBELLUCA, T. W., DURCIK, M., VOGLER, J. B., NULLET, M. A. Hydrologic effects of the expansion of rubber (*Hevea brasiliensis*) in a tropical catchment. **Ecohydrology**, v. 3, n. 3, p. 306-314, 2010.

HATFIELD, J. L.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Evaluation of canopy temperature - evapotranspiration models over various crops. **Agricultural and forest meteorology**, v. 32, n. 1, p. 41-53, 1984.

ISARANGKOOL NA AYUTTHAYA, S., DO, F. C., PANNENGPETCH, K., JUNJITTAKARN, J., MAEGHT, J. L., ROCHETEAU, A., COCHARD, H. Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement: multi-species calibration and field evaluation. **Tree Physiology**, v. 30, n. 1, p. 139-148, 2010.

JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J., & PINTER JR, P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water resources research**, v. 17, n. 4, p. 1133-1138, 1981.

JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress. In: **Advances in irrigation**. Elsevier, 1982. p. 43-85.

LIAKATAS, A., PROUTSOS, N., ALEXANDRIS, S. Optical properties affecting the radiant energy of an oak forest. **Meteorological Applications**, v. 9, n. 4, p. 433-436, 2002.

LING, Z., SHI, Z. T., GU, S. X., PENG, H. Y., FENG, G. J., & HUO, H. Energy balance and evapotranspiration characteristics of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations in Xishuangbanna, Southwest of China. **Appl. Ecol. Environ. Res.**, 2021.

LINS, F. A. C., ARAÚJO, D. C. S., DA SILVA, J. L. B., LOPES, P. M. O., OLIVEIRA, J. D. A. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido pernambucano utilizando sensoriamento remoto. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 64-75, 2017.

MACHADO, N. G., BIUDES, M. S., ANGELINI, L. P., MÜTZENBERG, D. M. D. S., NASSARDEN, D. C. S., BILIO, R. D. S., DA SILVA, J. A., NEVES, G. A. R., DE ARRUDA, P. H. Z., NOGUEIRA, J. D. S.. Sazonalidade do balanço de energia e evapotranspiração em área arbustiva alagável no Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 82-91, 2016.

MARTINS, I. P., DE FARIA, R. T., PALARETTI, L. F., DALRI, A. B., OLIVERIO, C., LIBARDI, L. G. P. Lisímetros de pesagem para medidas de evapotranspiração em estufa. **IRRIGA**, v. 22, n. 4, p. 715-722, 2017.

MELEXIS. MLX90614 family, Revision 13, 2019 Disponível em:<<https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90614>> Acesso em: 02/05/2021

MENDES, M. E. G., VILLAGRA, M. M., DE SOUZA, M. D., BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Relações hídricas em seringal no município de Piracicaba, SP. **Scientia Agricola**, v. 49, n. SPE, p. 103-109, 1992.

MOORHEAD, J. E., MAREK, G. W., GOWDA, P. H., LIN, X., COLAIZZI, P. D., EVETT, S. R., KUTIKOFF, S. Evaluation of evapotranspiration from eddy covariance using large weighing lysimeters. **Agronomy**, v. 9, n. 2, p. 99, 2019.

MORAES, V. H. F. Sugestões para uniformização da metodologia de estudo da fenologia foliar da seringueira. **Embrapa Amazônia Ocidental-Documentos (INFOTECA-E)**, 1982.

PEREIRA, A. V, FIALHO, J. de F, PEREIRA, E. B. C, JUNQUEIRA, N. T. V, MARTINS, M. A, MATTOSO, L. H. C, LIMA, W. A. A. de, DIANESE, A. de C, ALVES, R. T, VEIGA, A. D, FALEIRO, F. G, CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. DA, BRAGA, M. F, MALAQUIAS, J. V. Desempenho de clones de seringueira na região Centro-Oeste do Brasil. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2020.

PILAU, F. G; ANGELOCCI, L. R. Área foliar e interceptação de radiação solar pela copa de uma laranjeira. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p.476-482, 2015.

PILAU, F. G; ANGELOCCI, L. R. Padrões de interceptação de radiação solar por cafeeiros em função da área foliar. **Coffee Science**, v.11, n.1, p.127-136, 2016.

RUAIUEN, W., FOCHESSATTO, G. J., KASEMSAP, P., & CHAYAWAT, C. Energy Fluxes and Evapotranspiration in a Rubber Agroecosystem of the Southern Thailand. **Walailak Journal of Science and Technology (WJST)**, v. 18, n. 1, p. 6541, 2021.

SANTOS, M. B.; MATIAS, M. I. A.S., FREITAS, R. M. O.; SILVA, E. E.; ALVES, D. S.; SENA, L. S.. Eficiência da cobertura morta oriunda de diferentes espécies de plantas cultivadas no Baixo Sul na produção de alface elba. In: WELINGTON JUNIOR JORGE; CECILIO ARGOLO JUNIOR. (Org.). **DA EDUCAÇÃO BÁSICA AO ENSINO SUPERIOR: OS DESAFIOS DOS DOCENTES NO SÉCULO XXI (VOLUME II)**. 1ed,

2020, v. II, p. 71-82.

SECCO, R.S.; BIGIO, N.C. 2020. *Hevea in Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB22704>>. Acesso em: 22 jul. 2021.

SHAHADHA, S. S., WENDROTH, O., ZHU, J., & WALTON, J. Can measured soil hydraulic properties simulate field water dynamics and crop production?. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105661, 2019.

SHUTTLEWORTH, W. J. Observations of radiation exchange above and below Amazonian Forest. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 110, n. 466, p. 1163-1169, 1984.

SILVA, T. J. A, FOLEGATTI, M. V, SILVA, C, R, ALVES JÚNIOR, J, BONFIM-SILVA, E. M. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 392-403, 2007.

Smart sensors: global average sales price 2010-2020. **Statista Research Department**, 2021. Disponível em:<<https://www.statista.com/statistics/736563/global-average-sales-price-of-smart-sensors/>> Acesso: 02/06/2022

SOPHARAT, J., GAY, F., THALER, P., SDOODEE, S., ISARANGKOOL NA AYUTTHAYA, S., TANAVUD, C., ... DO, F. C. A simple framework to analyze water constraints on seasonal transpiration in rubber tree (*Hevea brasiliensis*) plantations. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 753, 2015.

SOUSA, D. D. P., FERNANDES, T. F. S., TAVARES, L. B., FARIAS, V. D. D. S., DE LIMA, M. J. A., NUNES, H. G. G. C., ... & SOUZA, P. J. D. O. P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 5-22, 2021.

TAKAHASHI, H., NAKAGAWA, K., YAMAKAWA, S., TANAKA, Y., MAEDA, Y., HAO, Y., ... & ZENG, P. Micrometeorological characteristics of a rubber plantation on Hainan Island, China. **Geographical review of Japan, Series B.**, v. 62, n. 2, p. 179-191, 1989.

TAN, Z. H., ZHANG, Y. P., SONG, Q. H., LIU, W. J., DENG, X. B., TANG, J. W., ... & LIANG, N. S. Rubber plantations act as water pumps in tropical China. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 24, 2011.

TEXAS INSTRUMENTS. LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Texas, 2017. 39 p.

UCAK, A. B., GENCOGLAN, C., BAGDATLI, M. C., TURAN, N., ARSLAN, H., & INAL, B. Determination of water-efficiency relationships and silage quality characteristics of the maize species for silage (*Zea Mays* L.) The First Product Grown Under Semi-Arid Climate Conditions. **Fresen. Environ. Bull**, v. 25, n. 12A, p. 6054-6068, 2016.

USINAINFO. Anemômetro Arduino / Sensor de Vento para Estação Meteorológica - SV10 Disponível em:<<https://www.usinainfo.com.br/estacao-meteorologica-arduino/anemometro-arduino-sensor-de-vento-para-estacao-meteorologica-sv10-3686.html>> Acesso em: 02/05/2021

VELLAME, L. M.; COELHO, R. D.; TOLENTINO, J. B. Transpiração de plantas jovens de laranjeira “Valência” sob porta-enxerto limão “Cravo” e citrumelo “Swingle” em dois tipos de solo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 1, p. 024-032, 2012.

VELLAME, L. M.; RAABE, A.; DE JONG VAN LIER, Q.; DE ARAÚJO, J C. Evapotranspiration measurements in the Brazilian Caatinga dry forest. In: **Meteorologie Tagung DACH 2022**, 2022, Leipzig. Proceedings. Leipzig: DACH, 2022.

VISHAY. Silicon PIN Photodiode. Revision 2, 2021. Disponível em:<<https://www.vishay.com/docs/81503/bpv10nf.pdf> >. Acesso em: 02/05/2021

WANG, S., PAN, M., MU, Q., SHI, X., MAO, J., BRÜMMER, C., JASSAL, R. S., KRISHNAN, P., LI, J., BLACK, T. A. Comparing evapotranspiration from eddy covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over Canada. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 4, p. 1540-1560, 2015.

ZELEKE, K. T., WADE, L. J. Evapotranspiration estimation using soil water balance, weather and crop data. **Evapotranspiration-Remote sensing and modeling**, p. 41-58, 2012.

ZHANG, K., KIMBALL, J. S., & RUNNING, S. W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 3, n. 6, p. 834-853, 2016.

II. ESTIMANDO O POTENCIAL DA ÁGUA NO CAULE PELO MONITORAMENTO CONTÍNUO DE SUA UMIDADE

RESUMO: Informações a respeito das relações hídricas das espécies florestais são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias no manejo dos recursos naturais. O monitoramento do contínuo do potencial hídrico do caule é vantajoso para o manejo e estudo das relações hídricas de espécies florestais, mas sua viabilidade econômica nem sempre é tangível diante do custo dos instrumentos. Diante disso, é interessante a proposição de métodos alternativos de baixo custo para o monitoramento desta variável. O objetivo do presente trabalho é de avaliar uma metodologia de monitoramento contínuo de baixo custo o potencial hídrico do caule (Ψ_c). Em uma planta foi estimado o (Ψ_c) com base no monitoramento contínuo de sua umidade do caule. Na mesma planta foi medido o fluxo de seiva (FS) pelo método da Razão de Calor e umidade do solo por meio de sensores similares ao utilizado na umidade do caule. Relacionando as leituras de umidade pelo método gravimétrico e potencial hídrico (WP4) observou-se que as amostras retiradas no sentido transversal apresentaram maior coeficiente de correlação (R^2 0,966) que as amostras retiradas no sentido longitudinal. Os desvios da curva ajustada encontram-se em sua maioria próximos a faixa de incerteza do WP4 (100 KPa). A coleta de dados ocorreu entre 08/03/2022 e 07/04/2022 na Unidade Campo do Instituto Federal Baiano *campus* Valença. Não foi observado uma relação direta do FS com a diferença de potencial entre solo e caule. O período monitorado foi marcado por dias de baixa demanda atmosférica, e baixa variação na disponibilidade de água do solo. A metodologia proposta foi capaz de monitorar de forma contínua de baixo custo o Ψ_c . Para estudo dos processos de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera, se faz necessário o monitoramento dos potenciais e do fluxo de seiva em um período mais longo de tempo.

Palavras-chave: retenção de água no caule, fluxo de seiva, potencial de água no solo, seringueira

Estimating stem water potential by continuously monitoring its moisture

ABSTRACT: Information about the water relations of forest species is essential for the development of strategies in the management of natural resources. The continuous monitoring of the water potential of the stem is advantageous for the management and study of the water relations of forest species, but its economic viability is not always tangible given the cost of the instruments. Therefore, it is interesting to propose alternative low-cost methods for monitoring this variable. The objective of the present work is to evaluate a methodology of continuous monitoring of low cost the water potential of the stem (Ψ_c). In one plant, the (Ψ_c) was estimated based on the continuous monitoring of its stem moisture. In the same plant, the sap flow (FS) was measured by the Heat Ratio method and soil moisture using sensors like those used for stem moisture. Relating the moisture readings by the gravimetric method and water potential (WP4), it was observed that the samples taken in the transverse direction had a higher correlation coefficient (R^2 0.966) than the samples taken in the longitudinal direction. most close to the WP4 uncertainty range (100 KPa). Data collection took place between 03/08/2022 and 04/07/2022 at the Campo Unit of the Instituto Federal Baiano campus Valença. A direct relationship between FS and the potential difference between soil and stem was not observed. The monitored period was marked by days of low atmospheric demand, and low variation in soil water availability. The proposed methodology was able to continuously monitor the Ψ_c in a low-cost manner. To study the water transfer processes in the soil-plant-atmosphere system, it is necessary to monitor the potentials and the sap flow over a longer period.

Keywords: stem water retention, sap flow, soil water potential, rubber tree

1. INTRODUÇÃO

Informações a respeito das relações hídricas das espécies florestais são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias no manejo dos recursos naturais. A determinação do potencial de água na planta é importante para a determinação dos limites de estresse hídrico e para a modelagem do transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera.

O estresse hídrico tem impacto direto no desempenho da planta. Durante a queda do potencial hídrico, as trocas gasosas diminuem, em consequência seu rendimento

e crescimento diminuem também, chegando a afetar a sobrevivência do vegetal. Diante disso, torna-se essencial o acompanhamento do estado hídrico da planta para a melhor compreensão a cerca do manejo das espécies florestais sob diferentes condições ambientais (MALAVASI et al., 2016).

Compreender o movimento da água no *continuum* solo-planta-atmosfera é importante para diversos estudos em diferentes escalas espaciais e temporais. Dada a complexidade das vias de transferência de água através desse sistema, o fluxo é geralmente calculado em função da diferença de potencial e da resistência hidráulica entre dois pontos. O movimento de água nas plantas em condições naturais é um fluxo transitório controlado pela configuração da planta (parte aérea e sistema radicular), hidráulica do solo e condições atmosféricas. Apesar do progresso significativo no desenvolvimento de modelos, uma descrição mecanicista do transporte de água não foi desenvolvida ou permanece incompleta, prevalecendo o uso de modelos de resistência simplificados.

O potencial hídrico das plantas (Ψ_w) tradicionalmente é determinado pela câmara de pressão proposta por Scholander et al (1965). O método utiliza folhas recém-colhidas antes do amanhecer e no pico de radiação solar para a medição. Entretanto trata-se de uma metodologia trabalhosa, destrutiva, custosa e não permite o monitoramento contínuo do Ψ .

O monitoramento não destrutivo do teor de água em árvores vivas proporciona a detecção instantânea do estresse hídrico das plantas, viabiliza estudos de mecanismos de uso de água em árvores e fornece informações a respeito da capacidade de armazenamento de caules de madeira (MALAVASI et al., 2016; SAITO et al., 2016).

Atualmente encontram-se metodologias não destrutivas para a medição do estado da água das plantas. Os psicrômetros de caule monitoram de forma precisa o potencial hídrico de plantas vivas sem danificá-las. Yang et al (2013) utilizaram o instrumento para acompanhar o potencial hídrico do caule de uma espécie de carvalho durante um período sem chuva no sudeste da Austrália. Uma de suas desvantagens é sua aplicabilidade em árvores de maiores diâmetros de caule (o máximo suportado é de 12,5 cm) (ICT INTERNATIONAL).

De forma indireta pode-se estimar o Ψ com base na umidade do caule. Donato et al (2014) apontavam os medidores elétricos como alternativa a metodologias de

determinação de umidade, já que se tratam de métodos não destrutivos, de rápida resposta, porém necessitam de calibração para minimização dos erros. Segundo Malavasi et al (2016) o Time Domain Reflectometry (TDR) é adequado para o monitoramento do conteúdo de água no caule. É automatizável e proporciona o acompanhamento das mudanças diurnas e noturnas no estado da água do tronco de árvores. Hernandez-Santana et al. (2008) também utilizando TDR, constataram que o teor de água do caule de duas árvores do mediterrâneo diminui à medida que a disponibilidade hídrica do solo reduz, que essa diferença reflete a retirada de água do caule para suprir as demandas transpiratórias da árvore.

Os dendrômetros acompanham a variação no diâmetro da árvore e essa amplitude de variação diária está intimamente relacionada com o potencial hídrico da planta ao amanhecer (ORTUNÕ et al., 2006; MALAVASI et al., 2016). Ortunõ et al (2006) reportaram queda no diâmetro mínimo e máximo diário do limoeiro à medida que o estresse hídrico foi aumentando, e observou o aumento dessa variável com a retomada da irrigação da árvore monitorada.

O monitoramento do contínuo do potencial hídrico do caule é vantajoso para o manejo e estudo das relações hídricas de espécies florestais, mas sua viabilidade econômica nem sempre é tangível diante do custo dos instrumentos. Diante disso, é interessante a proposição de métodos alternativos de baixo custo para o monitoramento desta variável.

Sistemas alternativos representam em geral um custo significativamente mais baixo quando comparados aos sistemas de monitoramento padrões, superando assim as limitações de orçamento nos estudos. Porém, para medições mais confiáveis e acuradas, é de fundamental importância que haja a avaliação desses sistemas afim de identificar e minimizar as possíveis fontes de erros.

O objetivo do presente trabalho é de avaliar uma metodologia de monitoramento contínuo de baixo custo do potencial hídrico com base na medição de umidade do caule.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Sensor de Umidade e Potencial Hídrico do Caule

O sensor utilizado para a estimativa da umidade do caule utiliza hastes de metal como eletrodos, desta forma, a variação tanto na constante dielétrica quanto na

resistência elétrica do caule fará variar também a frequência no oscilador (Circuito Integrado 555) que é lida pela placa Arduino Pro-Mini e transmitida via comunicação serial (Figura 1) (ARAÚJO et al., 2021).

A fim de monitorar a umidade do caule e calibração para a espécie estudada, a sonda construída possuía hastes de metal de 3cm, a placa foi envolta por resina epóxi para a proteção contra as intempéries do campo.

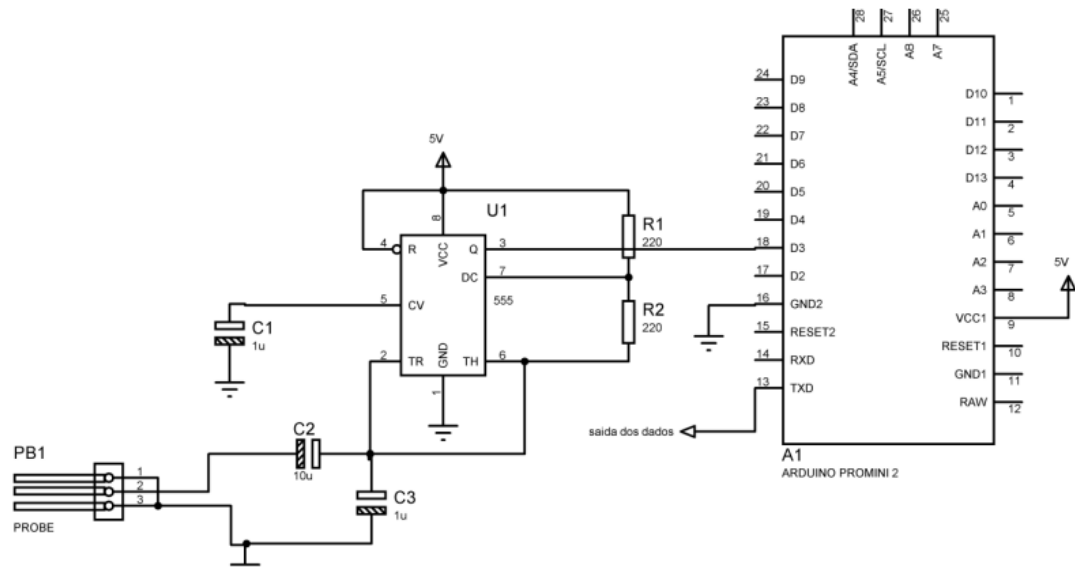


Figura 1. Diagrama elétrico da sonda eletrônica de umidade

Para a calibração do sensor foram retiradas 4 seções de 10 cm da base do caule da seringueira. Imergiu-se as seções em água para a saturação do lenho. Quando saturados perfurou-se as amostras para a inserção da sonda. Após a perfuração, foi determinado o volume pelo método de imersão (BRUDER et al., 2016) e a massa das amostras saturadas, em seguida as sondas de umidade do caule foram inseridas e tomado o valor das frequências dada pelo sensor. As amostras foram desidratadas ao ar livre e os valores da frequência e da massa coletados em tempos variáveis para obtenção de vários pontos de umidade coletados pelo sensor (Figura 2), posteriormente as amostras foram levadas em estufa à $103^{\circ}\pm 2$ para a obtenção do peso seco utilizado no cálculo da umidade pelo método gravimétrico.

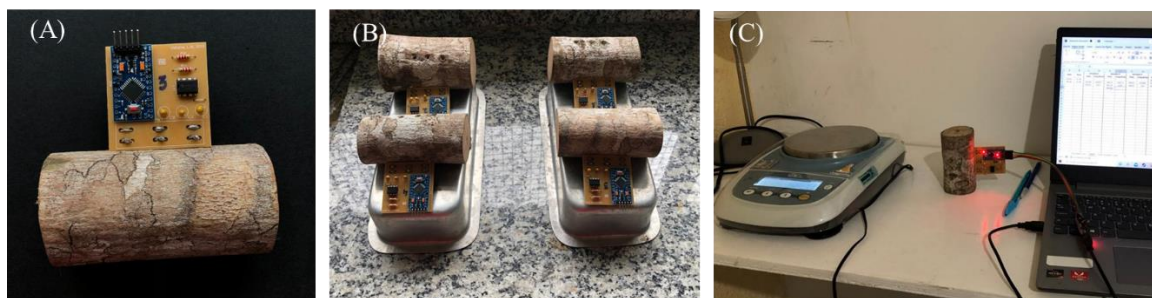


Figura 2. (A) Seção com o sensor inserido; (B) Amostras desidratando ao ar livre; (C) Realização de leitura na calibração.

A curva de retenção de água no caule foi confeccionada utilizando o WP4. O instrumento mede com boa precisão ($<0,1\text{Mpa}$) o potencial hídrico da amostra em um curto intervalo de tempo (DECAGON DEVICES, 2007). Foram selecionadas 6 amostras, sendo 3 compostas por pequenas lascas do caule da seringueira retiradas no sentido transversal (TR1, TR2, TR3) e 3 no sentido longitudinal (LG1, LG2, LG3) (Figura 3), e as leituras foram realizadas em tempos variáveis para a observação do potencial em diferentes pontos de umidade. Logo após a leitura do equipamento, as amostras eram pesadas em balança analítica para a determinação da sua umidade com base no método gravimétrico

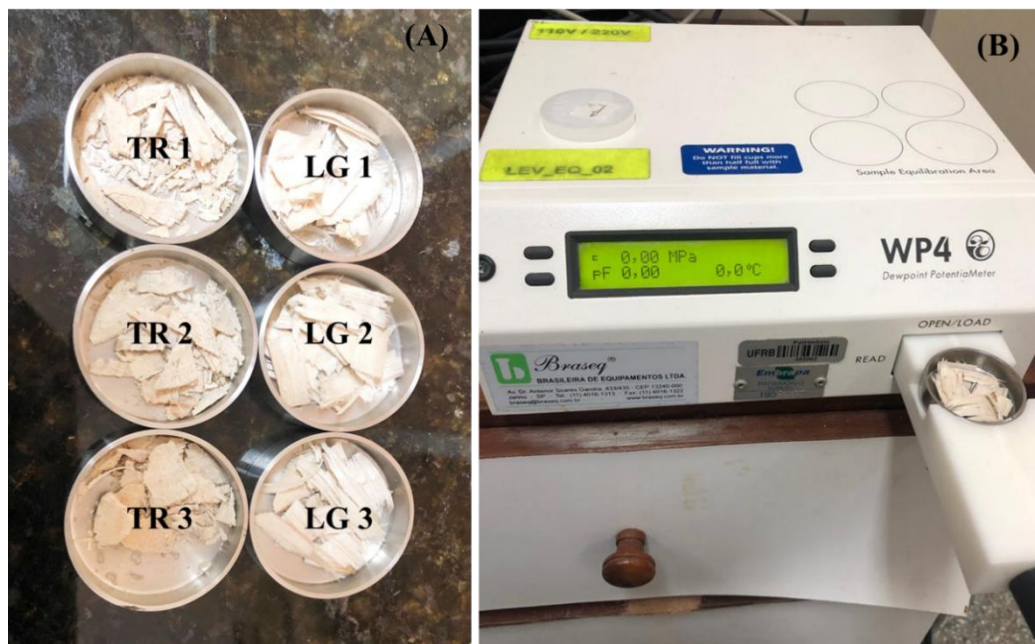


Figura 3 - (A) Amostras de caule no sentido transversal (fileira a esquerda) e longitudinal (fileira a direita); (B) Amostra pronta para a leitura no instrumento

Relacionou-se o potencial hídrico do caule com a umidade em que a amostra se encontrava e escolheu-se o modelo matemático que melhor se ajustou aos dados. Foi determinada também a incerteza da curva de retenção de água no caule. Com as

leituras de umidade do caule e de posse da equação de retenção, estimou-se de forma contínua o potencial hídrico do caule ao longo do período de monitoramento.

Calculou-se também a incerteza esperada na estimativa da curva de retenção de água no caule em função da combinação das incertezas de medição. Como as variáveis de entrada são independentes e apresentam a mesma sensibilidade, foi utilizada a Equação 1, que melhor combina os efeitos dos erros de medição.

$$U_c = \sqrt{\sum u_x^2} \quad (1)$$

Em que:

U_c: incerteza combinada;

u_x: incerteza na medição da variável i;

2.2. Monitoramento de campo

A coleta de dados ocorreu entre 08/03/2022 e 07/04/2022 na Unidade Campo do Instituto Federal Baiano *campus* Valença (13°20'39.7"S; 39°07'35.9"W). Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo "Af" (tropical quente e úmido), com precipitação média anual de 2109 mm, temperatura média anual de 24,6 °C e, de acordo com Santos et al (2020), o solo presente na área experimental é o Latossolo Amarelo. No período de coleta de dados a Precipitação acumulada foi de 562 mm, com Temperatura do ar média de 21,9°C e Evapotranspiração de Referência média de 6 mmdia⁻¹ (Figura 4).

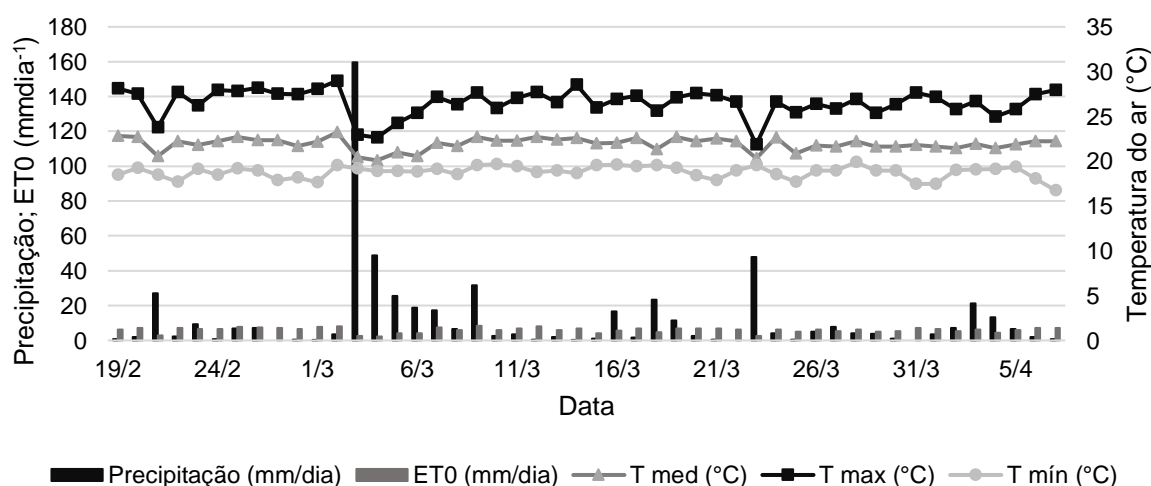


Figura 4. Precipitação, Evapotranspiração de Referência e Temperaturas máximas, médias e mínimas em escala diária

Na área estudada encontra-se um sistema agroflorestal de seringueira (*Hevea brasiliensis*), cacau (*Theobroma cacao*) e gliricídia (*Gliricidia sepium*). Os indivíduos

da espécie utilizada neste trabalho foram plantados em fileira dupla no ano de 2015, o espaçamento dentro da fileira é de 3x2,5 metros. No preparo da área do consórcio foi realizado o preparo do solo, calagem e posteriormente tratos culturais e adubação, bem como controle de matocompetição.

Em uma planta foi estimado o potencial de hídrico do caule (Ψ_c) com base no monitoramento contínuo de sua umidade. Na mesma planta foi medido o fluxo de seiva (FS) pelo método da Razão de Calor (Burgess et al., 2001) e umidade do solo por meio de sensores similares ao utilizado na umidade do caule (Figura 5).



Figura 5. (A) Representação esquemática da alocação dos instrumentos de medição na seringueira; (B) Sensores de umidade do caule e fluxo de seiva em funcionamento; (C) Sensores de umidade do solo no durante a instalação

2.3. Umidade e potencial da água do solo

Os sensores para a estimativa da umidade do solo (θ) utilizam o mesmo princípio da sonda de umidade do caule. Para o monitoramento da umidade do solo foram construídas 2 sondas com hastes de 9 cm (Figura 5 C), revestidas com resina epóxi para proteção da placa em campo. A 75 cm de distância da planta, inseriu-se duas sondas horizontalmente, uma a 10 cm e outra a 30 cm de profundidade (no centro de 2 camadas de 20 cm) (Figura 5 C).

Para a calibração das sondas, amostras deformadas das duas camadas monitoradas do solo da área experimental foram dispostas em recipientes com densidade equivalente a encontrada em campo. Após a saturação das amostras, foram desidratadas ao ar livre e posteriormente levadas em estufa à $105^{\circ}\pm 2$ por 72 horas para a coleta do peso seco. Durante a secagem, valores de massa e de

frequência relativa (fr) foram coletadas para a construção da curva de calibração do sensor para o solo em questão.

Em função das diferenças estruturais entre as duas camadas de solo monitoradas, a resposta dos sensores de umidade também foi diferente, portanto optou-se por tratá-las de forma separada, ajustando uma equação para cada afim de minimizar os erros na estimativa da umidade (Equação 2 e 3). O desvio absoluto médio foi de 5,3%, portanto, em 95% das estimativas espera-se um erro inferior a 0,027 cm³cm³ na umidade do solo. Tomaselli & Bacchi (2001) realizaram a calibração de sondas de TDR (Time Domain Reflectometry) para 5 tipos de solos diferentes e encontraram erros absolutos inferiores a 10%. Coelho et al (2006), também utilizando sondas de TDR encontraram desvio absoluto médio de 8,7% na calibração para um Latossolo Amarelo Distrófico.

$$\theta_{0-20 \text{ cm}} = 0,2656 \text{ fr} + 0,0924 \quad (R^2=0,983) \quad (2)$$

$$\theta_{20-40 \text{ cm}} = 0,2762 \text{ fr} + 0,0611 \quad (R^2=0,900) \quad (3)$$

A curva de retenção da água do solo foi produzida utilizando a Câmara de Richards, nela amostras indeformadas das camadas de 0-20 cm e de 20-40 cm coletadas na área de estudo foram submetidas a pressões de 10, 30, 100, 300 e 500 KPa e suas respectivas massas anotadas após o período de estabilização.

Para o ajuste dos dados, utilizou-se o modelo de Van Genuchten (1987) (Equação 4) e ajustou-se os parâmetros no software Excel (Microsoft, 2011) por meio da ferramenta Solver.

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha * \Psi)^n]^m} \quad (4)$$

Onde:

θ_r : Umidade residual (cm³cm⁻³);

θ_s : Umidade de saturação (cm³cm⁻³);

Ψ : potencial matricial (KPa);

α , n , m : parâmetros empíricos do modelo.

Na Tabela 2 encontram-se os parâmetros ajustados da equação de Van Genuchten (1987). Assim como na calibração do solo, tratamos as camadas de 0-20

e de 20-40 de forma separada, gerando assim uma curva de retenção para cada .

Tabela 2. Parâmetros da Equação de Van Genuchten (1987) ajustados para a camada de 0-20cm e de 20-40cm de profundidade.

Parâmetros	0 – 20 cm	20 – 40 cm
a	0,01	0,05
n	0,31	2,28
m	0,48	0,12
Θ_r (cm ³ /cm ³)	0,05	0,05
Θ_s (cm ³ /cm ³)	0,44	0,40
R ²	0,9807	0,9947
RMSE	0,000035	0,000026

2.4. Fluxo de seiva

Para o cálculo do fluxo de seiva foi utilizado o Método da Razão de Calor proposto por Burgess et al. (2001) (Equação 3 e 4). A partir de um pulso de calor enviado ao tronco é registrado o movimento do fluxo de seiva em uma dada área do xilema. As propriedades térmicas da madeira, correção do desalinhamento da sonda e correção da ferida foram calculadas seguindo a metodologia também descrita por Burgess et al (2001).

$$V_c = \frac{4 K \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) - x_2^2 + x_1^2}{2 t (x_1 - x_2)} \times \beta \times 3600 \quad (3)$$

$$d_{FS} = \frac{V_c \rho_b (c_w + m_c c_s)}{\rho_s c_s} \quad (4)$$

Em que:

V_c: velocidade do pulso de calor corrigida (cm h⁻¹);

K: difusividade térmica do caule (cm² s⁻¹);

x₁, x₂: espaçamentos corrigidos dos sensores em relação ao aquecedor (cm);

v₁, v₂: aumentos de temperaturas nas sondas acima e abaixo do aquecedor em determinado tempo de medição;

t: tempo de medição (s);

β: coeficiente empírico em função do diâmetro da ferida adimensional.

d_{FS}: densidade de fluxo de seiva (cm h⁻¹);

ρ_b: densidade da madeira (kg cm⁻³);

c_w: calor específico da matriz da madeira (1200 J.kg⁻¹ °C⁻¹);

cs: calor específico da seiva ($4182 \text{ J.kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$);

mc: teor de água no alburno;

ps: densidade da água (kg cm^{-3}).

O sensor de fluxo de pulso de calor é composto por duas sondas para medição de temperatura e uma sonda aquecedora. Nas sondas de medição de temperatura são utilizados termopares de cobre-constantan, de 0,5 mm de diâmetro, inseridos em agulhas hipodérmicas de 1 mm de diâmetro interno e 2 cm de comprimento. A sonda de aquecimento é composta por uma agulha hipodérmica de 0,8 mm de diâmetro interno, também de 2 cm de comprimento, revestida por fio de constantan, o qual eleva de temperatura por meio de um pulso elétrico enviado. Em campo, as sondas de temperatura foram inseridas verticalmente a 0,6 cm de distância do aquecedor (Figura 5 B).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Umidade e potencial da água no caule

O funcionamento das três sondas de umidade do caule utilizadas na calibração ocorreu de forma similar. As variações observadas foram relativamente pequenas e possivelmente estão relacionadas com a instalação dos sensores no caule, como por exemplo o ângulo de inserção, folga das hastes e profundidade das mesmas.

A curva de calibração dos sensores de umidade do caule (Figura 6 A), evidenciou uma tendência linear entre a umidade volumétrica e a frequência relativa. O desvio absoluto médio foi de de 3,4%. De acordo com os dados, em 95% das leituras, espera-se que o erro seja inferior a $0,03 \text{ cm}^3\text{cm}^3$ na umidade (7%) (Figura 6 B). Trabalhando com o mesmo sensor em duas espécies com características anatômicas do lenho distintas, Araújo et al (2021), reportaram desvio absoluto médio entre o valor estimado e a umidade medida do caule médio de 1,4%, corroborando com os resultados obtidos no presente estudo.

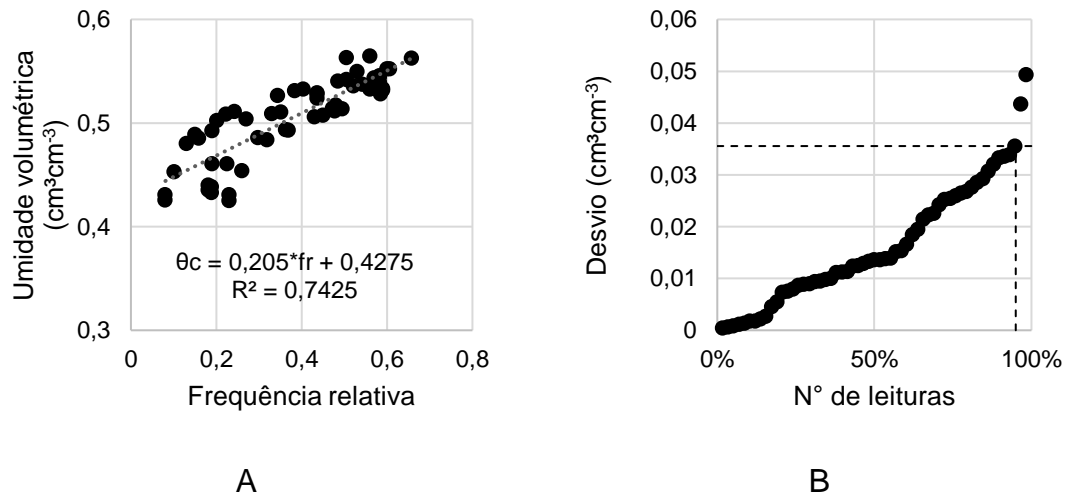


Figura 6. (A) Equação de calibração do sensor de umidade do caule; (B) Desvios na estimativa da θ_c

Relacionando as leituras de umidade pelo método gravimétrico e potencial hídrico observou-se que as amostras retiradas no sentido transversal apresentaram maior coeficiente de determinação que as amostras retiradas no sentido longitudinal (Figura 7 A). O corte no sentido transversal expõe em maior grau a abertura dos elementos de vaso, que são responsáveis pelo movimento de água no xilema (Figura 6B). Essa exposição dos vasos contribui para que o equilíbrio psicrométrico na câmara do WP4 seja atingido mais facilmente diminuindo os erros de leitura. Diante disso, para fins de análise dos dados monitorados em campo optou-se por selecionar apenas as amostras retiradas no sentido transversal do caule.

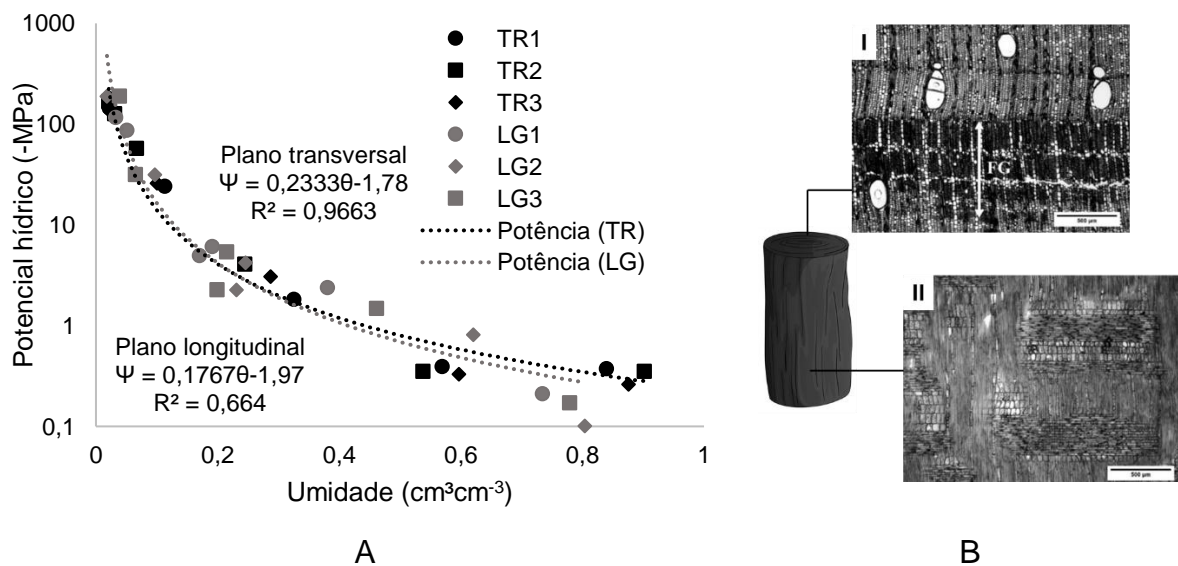


Figura 7. (A) Potencial hídrico em função da umidade do caule de todos os pontos amostrados no sentido transversal (TR1, TR2, TR3) e longitudinal (LG1, LG2, LG3); (B) Plano de corte transversal (I) e longitudinal da seringueira (II) e suas respectivas organizações anatômicas (Ramos et al., 2017 (adaptado))

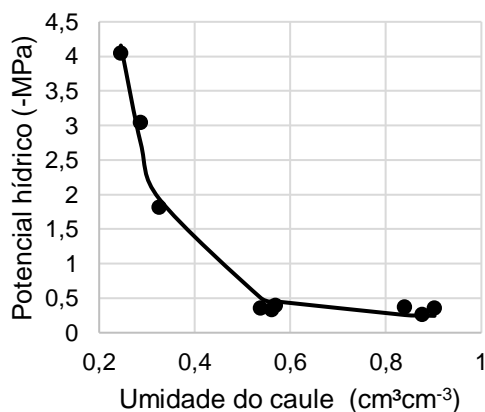
Utilizou-se os dados correspondentes a faixa de medição em campo (0 a -4MPa) para ajuste do modelo matemático Sigmoidal Assimétrico (Equação 5). Esse modelo foi o que melhor se ajustou ao conjunto de dados selecionados. Utilizou-se a ferramenta Solver no Excel para a parametrização da equação minimizando a raiz quadrada dos erros médios (RMSE) (Tabela 2).

$$y = d + \frac{a - d}{\left[1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b\right]^m} \quad (5)$$

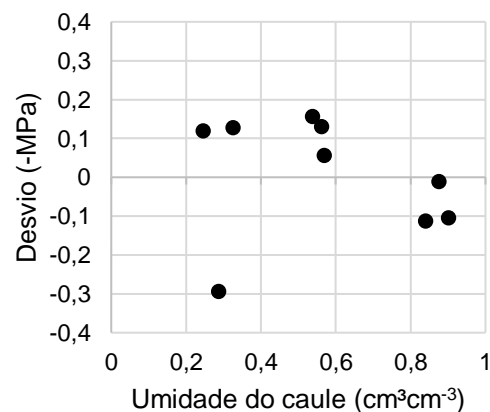
Tabela 2 - Parâmetros ajustados para os potenciais entre 0 e -4 MPa medidos com amostras retiradas no sentido transversal

Parâmetro	Valor ajustado
a	1034,89
b	0,4900
c	9,48x10 ⁸
d	0,21683
m	277509
R²	0,9946
RMSE	0,0194

Na Figura 8 A é apresentada a curva de retenção de água no caule ajustada através do modelo de regressão escolhido para a faixa de umidades de caule observadas em campo. Os desvios da curva ajustada encontram-se em sua maioria próximos a faixa de incerteza do equipamento (Figura 7B). Segundo a Decagon Devices (2007), fabricante do instrumento, a incerteza do WP4 é de ±0,1 MPa para potenciais de até -10MPa.



A



B

Figura 8. (A) Curva de retenção de água no caule ajustada através do modelo Sigmoidal Assimétrico; (B) Desvios na estimativa do potencial hídrico do caule

3.2. Monitoramento em campo

O processo de transpiração consiste no fluxo de vapor d'água entre as folhas e a atmosfera e pode-se ocorrer por duas vias, a cuticular e a estomática, sendo a segunda mais significativa em termos de quantidade de água movimentada. Uma vez que a água no solo é retirada pelas raízes e evaporada no interior das folhas, a transpiração é afetada pela disponibilidade de água no solo, por meio da regulação estomática ou pelo ajustamento osmótico. Portanto, a condutividade hidráulica no continuum solo-planta atmosfera é função da vegetação, da disponibilidade de água do solo e das condições meteorológicas (SILVA et al., 2003; LACERDA, 2007; COELHO FILHO et al., 2011).

Não foi observado uma relação direta do FS com a diferença de potencial entre solo e caule em escala horária. Da mesma forma, em escala diária a essas variáveis não apresentam relação linear (Figura 9).

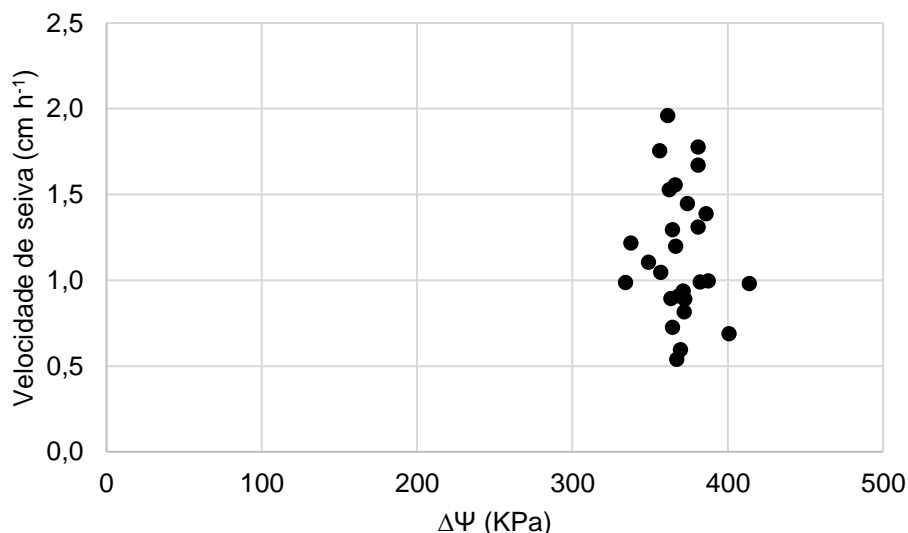


Figura 9. Velocidade de seiva em função da diferença de potencial hídrico médio diário entre o caule e solo

A partir dos valores de umidade do caule e do solo obtidos em campo, calculou-se os valores de potencial para o período de monitoramento (Figura 10). A incerteza calculada na estimativa do potencial de água no caule, foi $\pm 147,68$ KPa. A média dos valores máximos que $\Delta\Psi$ assumiu em um período de 24 horas foi de $-357,9$ KPa, com média dos mínimos de $-395,4$ KPa. O período monitorado foi marcado por dias de baixa demanda atmosférica, a Evapotranspiração de Referência média foi de 6

mmdia⁻¹, além disso, o valor de umidade do solo máximo registrado foi de 0,387 cm³cm⁻³ e o mínimo de 0,311 cm³cm⁻³. A baixa demanda atmosférica e a pequena variação na disponibilidade de água do solo podem explicar a baixa amplitude da $\Delta\Psi$ durante o dia. Observa-se que os valores horários de $\Delta\Psi$ se mantêm negativos mesmo em condições de alta umidade do caule e fluxo nulo, resultados semelhantes ao de Yang et al (2013). A manutenção de uma diferença de potencial ao longo do dia, mesmo em condições de fluxo nulo, inviabiliza a utilização de modelos estacionários de estimativa do fluxo de seiva em escala horária (Figura 10).

Yang et al (2013), empregaram o Ψ_{caule} ao amanhecer do carvalho caído como indicador do Ψ_{solo} próximo a zona radicular. Utilizaram o PSY, instrumento que em contato com o tecido xilemático, forma uma câmara psicrométrica para a medição do Ψ_{caule} em campo. Para um período de 7 dias, o Ψ_{caule} ao amanhecer variou de aproximadamente -0,7 MPa a -1,5 MPa, e Ψ_{caule} ao meio-dia de -1,4MPa a -2,5 MPa aproximadamente. Foi observado que o potencial do caule antes do amanhecer reflete as mudanças na água do solo no entorno da raiz. Os autores descrevem que a disponibilidade hídrica do solo influencia no potencial de água no caule, mas que não é única variável que influencia tal processo. Em dias com evapotranspiração potencial (EP) alta, as plantas sofrem mais estresse hídrico do que em dia com taxas de EP baixas, mesmo quando a disponibilidade de água é semelhante.

Ortunõ et al (2006) monitoraram o potencial hídrico do caule de limoeiros adultos, por meio de uma câmara de pressão. A cada 2 ou 3 dias, folhas maduras localizadas próximas ao caule eram coletadas para a medição. A planta controle (sem estresse hídrico) apresentou baixa variação do Ψ_{caule} , permanecendo entre -1,0 e -1,5 MPa. Já na planta submetida a estresse hídrico, o Ψ_{caule} decaiu à medida que o solo secava, partindo de -1,5 MPa para aproximadamente -3,0 MPa. Após a retomada da irrigação, o potencial da planta sob estresse retornou a faixa inicial.

Os resultados evidenciam que para um conhecimento mais profundo dos processos de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera é necessário monitorar o potencial hídrico do caule por maior intervalado de tempo, em que diferentes condições de armazenamento de água do solo e de demanda evaporativa da atmosfera sejam impostas sobre as plantas monitoradas.

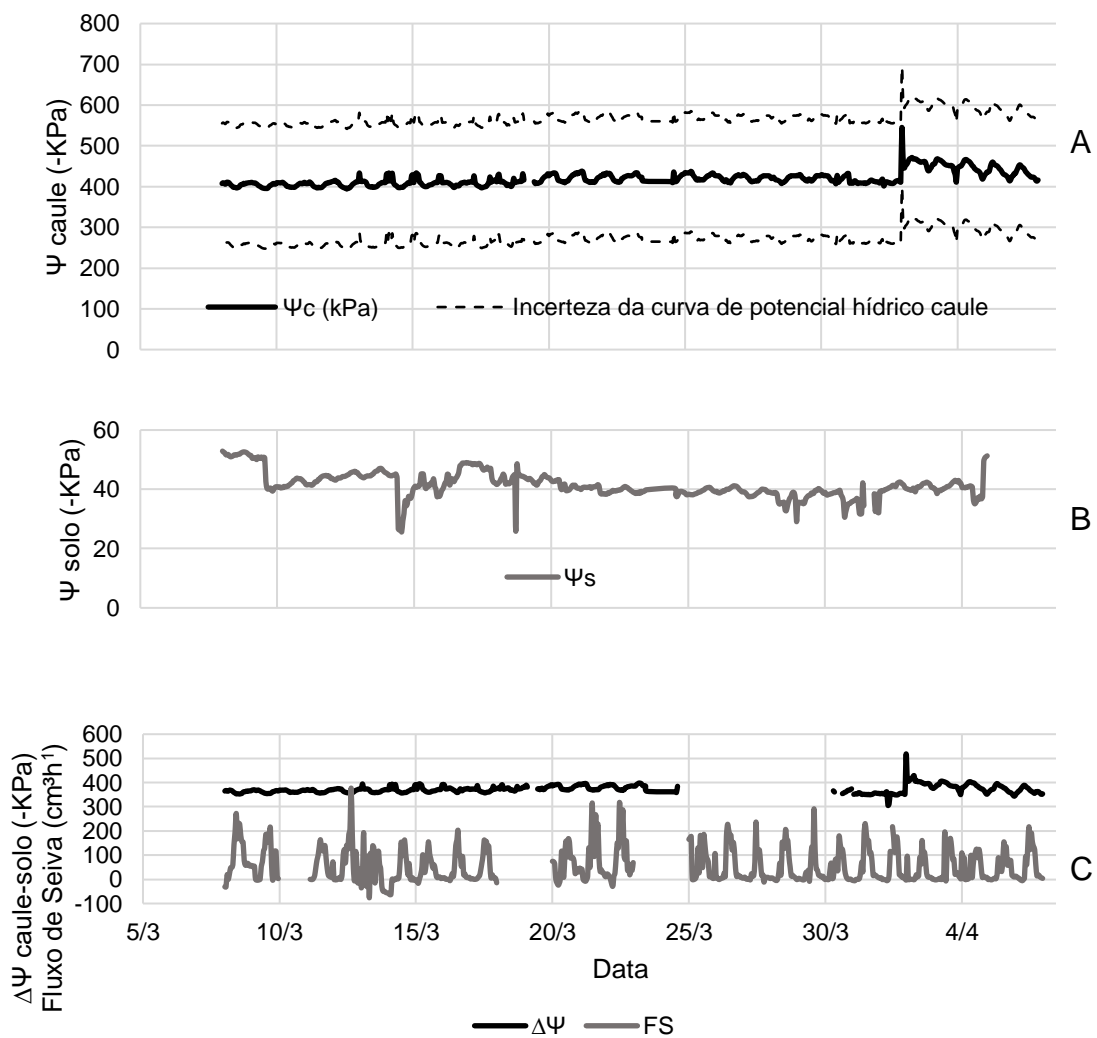


Figura 10. Potencial hídrico do caule (A), potencial matricial do solo (B), diferença de potencial entre o solo e caule e fluxo de seiva (C).

4. CONCLUSÃO

A metodologia proposta foi capaz de monitorar de forma contínua com baixo custo o potencial hídrico do caule.

No período monitorado não foi observado uma relação direta do fluxo de seiva com a diferença de potencial entre solo e caule tanto em escala horária quanto em escala

diária. Se manteve diferença de potencial entre caule e solo mesmo em condições de fluxo nulo, inviabilizando a utilização de modelos estacionários para fluxo de seiva em escala horária.

Para um conhecimento mais profundo dos processos de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera é necessário monitorar o potencial hídrico do caule por maior intervalado de tempo, em diferentes condições de armazenamento de água do solo e de demanda evaporativa da atmosfera.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, G. P., VELLAME, L. M., COSTA, J. A., COSTA, C. A. G. A low-cost monitoring system of stem water content: Development and application to Brazilian forest species. **Smart Agricultural Technology**, v. 1, p. 100012, 2021.

BRUDER, E. M.; DE REZENDE, M. A; COSTA, V. E. Densidade de eucalyptus sp. próxima a umidade de equilíbrio estimado pelo método de imersão. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 31, n. 1, p. 38-47, 2016.

BURGESS, S. S., ADAMS, M. A., TURNER, N. C., BEVERLY, C. R., ONG, C. K., KHAN, A. A., BLEBY, T. M. 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.

COELHO, E. F., VELLAME, L. D. M., COELHO FILHO, M. A., LEDO, C. A. D. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 30, p. 23-30, 2006.

DECAGON DEVICES. WP4 Dewpoint PotentiaMeter Operator's Manual. Pullman, 2007, 78 p.

DONATO, D. B., CASTRO, R. V. O., CARNEIRO, A. D. C. O., CARVALHO, A. M. M. L., PEREIRA, B. L. C., OLIVEIRA, A. C., BARBOSA, C. J. Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 80, p. 449-453, 2014.

HERNÁNDEZ-SANTANA, V; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J; MORAN, C. Estimation of tree water stress from stem and soil water monitoring with time-domain reflectometry in two small forested basins in Spain. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 22, n. 14, p. 2493-2501, 2008.

ICT INTERNATIONAL. Psychrometer PSY1 Manual. Armidale. 39 p.
MALAVASI, U. C., DAVIS, A. S., MALAVASI, M. D. M. Estimating water in living woody stems-a review. **Cerne**, v. 22, p. 415-422, 2016.

ORTUNO, M. F., GARCÍA-ORELLANA, Y., CONEJERO, W., RUIZ-SÁNCHEZ, M. C., ALARCÓN, J. J., TORRECILLAS, A. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. **Trees**, v. 20, n. 1, p. 1-8, 2006.

RAMOS, L. M. A., DE FIGUEIREDO LATORRACA, J. V., LIMA, H. R. P., DOS SANTOS, G. C. V. Variação intraespecífica na anatomia do lenho de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Mull. Arg. relacionada à extração de látex. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 255-264, 2018.

SAITO, T., YASUDA, H., SAKURAI, M., ACHARYA, K., SUEKI, S., INOSAKO, K., ... NAWATA, H. Monitoring of stem water content of native and Invasive trees In arid environments using GS3 soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 3, 2016.

SANTOS, M. B.; MATIAS, M. I. A.S., FREITAS, R. M. O.; SILVA, E. E.; ALVES, D. S.; SENA, L. S.. Eficiência da cobertura morta oriunda de diferentes espécies de plantas cultivadas no Baixo Sul na produção de alface elba. In: WELINGTON JUNIOR JORGE; CECILIO ARGOLO JUNIOR. (Org.). **DA EDUCAÇÃO BÁSICA AO ENSINO SUPERIOR: OS DESAFIOS DOS DOCENTES NO SÉCULO XXI (VOLUME II)**. 1ed, 2020, v. II, p. 71-82.

SCHOLANDER, P. F., BRADSTREET, E. D., HEMMINGSEN, E. A., HAMMEL, H. T. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science**, v. 148, n. 3668, p. 339-346, 1965.

TOMMASELLI, J. T. G; BACCHI, O. O. S. Santos. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 1145-1154, 2001.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Numerical Model for Water and Solute Movement. 1987.

YANG, Y., GUAN, H., HUTSON, J. L., WANG, H., EWENZ, C., SHANG, S., SIMMONS, C. T. Examination and parameterization of the root water uptake model from stem water potential and sap flow measurements. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 20, p. 2857-2863, 2013.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas alternativos propostos neste trabalho obtiveram bom desempenho na estimativa da evapotranspiração e do potencial hídrico do caule da seringueira. Além da facilidade de aquisição e baixo custo dos componentes, os instrumentos são de fácil montagem, tornando-os um grande aliado nos projetos de pesquisa.

A incerteza na estimativa da evapotranspiração utilizando o sistema proposto foi de 0,727 mm. A diferença de leitura entre o CNR4 e o sistema proposto em dias de baixo fluxo transpiratório foi convertida em erro, contribuindo para o expressivo valor na incerteza. A incerteza na estimativa do potencial de água no caule utilizando medidas de umidade com sensor alternativo foi de 147,68 KPa, influenciada pela acurácia do WP4 (100 KPa) utilizado para a curva de retenção de água no caule.

De maneira geral os valores de fluxo de seiva, evapotranspiração e potencial hídrico do caule foram baixos quando comparados ao encontrado na literatura. Diante do pequeno período de observação, torna-se necessário o monitoramento durante um maior intervalo de tempo afim de monitorar a transpiração e fluxo de seiva e diferentes condições de demanda evaporativa da atmosfera e de conteúdo de água no solo. Além do maior período de monitoramento, medidas de potencial da água na folha e em diferentes alturas do caule podem ser importantes para a compreensão dos fenômenos de transporte de água na planta.