

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

**ACLIMATAÇÃO A REDUÇÃO DO VOLUME DE SOLO
MOLHADO E FLUXO DE SEIVA NO GUARANAZEIRO**

Igor Leonardo Nascimento Santos

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
2022**

ACLIMATAÇÃO A REDUÇÃO DO VOLUME DE SOLO MOLHADO E FLUXO DE SEIVA NO GUARANAZEIRO

Igor Leonardo Nascimento Santos
Engenheiro Agrícola
Universidade Federal de Sergipe, 2016
Mestre em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Sergipe, 2018

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos)

Orientador: Prof. Dr. Lucas Melo Vellame
Coorientador: Prof. Dr. Vital Pedro da Silva Paz
Dra. Alide Mitsue Watanabe Cova

CRUZ DAS ALMAS- BAHIA
2022

FICHA CATALOGRÁFICA

S237a

Santos, Igor Leonardo Nascimento.

Aclimação a redução do volume de solo molhado e fluxo de seiva no guaranazeiro / Igor Leonardo Nascimento Santos. – Cruz das Almas, BA, 2022.

87f.; il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Melo Vellame.

Coorientador: Prof. Dr. Vital Pedro da Silva Paz.

Coorientadora: Dra. Alide Mitsue Watanabe Cova.

1.Guaraná – Aclimação (Plantas). 2.Guaraná – Evapotranspiração – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 634.1

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

**ACLIMATAÇÃO A REDUÇÃO DO VOLUME DE SOLO
MOLHADO E FLUXO DE SEIVA NO GUARANAZEIRO**

Comissão Examinadora da Defesa de Tese de
Igor Leonardo Nascimento Santos

Aprovada em 12 de dezembro de 2022

Documento assinado digitalmente
 LUCAS MELO VELLAME
Data: 10/02/2023 07:37:15-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame
Universidade federal do Recôncavo da Bahia / UFRB
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 JOSE ANTONIO FRIZZONE
Data: 22/02/2023 10:37:32-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. José Antonio Frizzone
Universidade de São Paulo / USP
(Examinador Interno)



Prof. Dr. Quirijn de Jong van Lier
Universidade de São Paulo / USP
(Examinador Externo)

Documento assinado digitalmente
 RAIMUNDO RODRIGUES GOMES FILHO
Data: 19/02/2023 09:00:43-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Raimundo Rodrigues Gomes Filho
Universidade Federal de Sergipe / UFS
(Examinador Externo)

Documento assinado digitalmente
 LUCIANO SOBRAL FRAGA JUNIOR
Data: 13/02/2023 10:08:18-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Dr. Luciano Sobral Fraga Junior
Embrapa Semiárido
(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, José Genisson de Santana Santos e Josinete da Silva Nascimento Santos, e a minha namorada, Lana Laís Pereira da Cruz, pela paciência, pelo amor, pelo incentivo e que mesmo a distância, estiveram presente e me apoiaram durante toda a jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, por me conceder a existência e por me dar forças e saúde para enfrentar esses anos difíceis e necessários para meu amadurecimento pessoal e profissional.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, estrutural e pela oportunidade de realizar essa etapa acadêmica.

Ao meu orientador Dr. Lucas Melo Vellame, pela paciência, dedicação, confiança e principalmente amizade. Sua orientação e contribuições científicas foram fundamentais para realização desse trabalho.

Ao meu coorientador Dr. Vital Pedro da Silva Paz, pelas oportunidades e ensinamentos dados.

À minha coorientadora Dra. Alide Mitsue Watanabe Cova e sua família, por todo o auxílio com o experimento e por me receber tão bem em suas casas.

A todos os professores do NEAS, pelo conhecimento passado dentro e fora da sala de aula.

A todos os meus colegas do pós-graduação, por dividir essa jornada e pelas boas discussões e risadas, em especial para Lumi Toyosumi e Leandro Costa, que dividiram os tempos difíceis e solitários da pandemia comigo, ajudando quando mais precisava.

Aos funcionários do programa, por todo o auxílio prestado e as boas conversas, em especial a Edilson (Boi), fundamental para a condução dos meus e muitos outros experimentos no programa.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização e concretização desta pesquisa.

Muito Obrigado!

RESUMO

O Brasil é o único produtor comercial de guaraná (*Paullinia cupana*) do mundo. A cultura tradicionalmente é explorada em ambientes úmidos nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, sem uso de irrigação. Na literatura científica são escassos os trabalhos sobre a dinâmica da água no guaranazeiro, informações essas, extremamente importantes para um correto planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação. O trabalho objetivou estudar a dinâmica da água no guaraná, a fim de compreender os mecanismos de aclimação da cultura exposta a déficit hídrico e redução do volume de solo molhado. Para tanto, duas áreas experimentais foram implantadas, a primeira em ambiente protegido com plantas jovens de guaraná em vasos de 500 L e a segunda com plantas adultas em uma propriedade produtora. O primeiro capítulo discute as incertezas relacionadas a estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier e da transpiração obtida com lisímetro de pesagem e estabelece as relações entre a demanda hídrica da atmosfera com o fluxo de seiva e a área foliar do guaranazeiro em estágio produtivo. No segundo capítulo foi estudada a aclimação de plantas jovens de guaranazeiro face à redução do volume de solo molhado. Foi observado o fluxo de seiva relativo ao tratamento controle ao longo do tempo e em relação a evapotranspiração de referência (ET_o) do período. Também foi quantificada a variação da área foliar, densidade de raízes e a diferença de temperatura foliar entre os tratamentos. No terceiro capítulo propõe-se a utilização de medidas pontuais de temperatura foliar em um método de balanço de energia na folha para estimar a transpiração do guaraná em condição de irrigação plena e em déficit. Foi utilizado o fluxo de seiva para estimar a absorvidade da radiação solar da folha, variável utilizada no balanço de energia. Pode-se concluir que o volume de solo molhado tem grande influência na dinâmica da água para a cultura, exigindo cuidados na irrigação localizada durante os veranicos em regiões úmidas. A temperatura foliar associada ao método de balanço de energia da folha permite estimar a transpiração mesmo com medidas descontínuas. A relação entre área foliar, fluxo de seiva e ET_o variou com o desenvolvimento da planta e existem diferenças nos processos de transpiração e fluxo de seiva em escalas temporais diárias, que podem influenciar a eficiência do manejo da irrigação uma vez que a irrigação visa repor a água retirada do solo, o que pode não corresponder a água evapotranspirada nesse intervalo.

Palavras Chave: relações hídricas, déficit hídrico, temperatura foliar, balanço de energia na folha.

ABSTRACT

Brazil is the only commercial producer of guarana (*Paullinia cupana*) in the world. The crop is traditionally exploited in humid environments in the North, Northeast and Midwest regions, without the use of irrigation. In the scientific literature don't exist works about the dynamics of water in the guarana tree, information that is extremely important for correct planning and management of irrigation. The objective of this work was to study the dynamics of water in guarana, in order to understand the mechanisms of acclimatization of the culture exposed to water deficit and reduction of the volume of wet soil. For this purpose, two experimental areas were implemented, the first in a protected environment with young guarana plants in 500 L pots and the second with adult plants in a producing property. The first chapter discusses the uncertainties related to the estimate of sap flow by the Granier method and transpiration obtained with a weighing lysimeter and establishes the relationships between the water demand of the atmosphere with the sap flow and the leaf area of the guarana tree in the productive stage. In the second chapter, the acclimatization of young guarana plants to the reduction in the volume of wet soil was studied. The sap flow relative to the control treatment was observed over time and in relation to the reference evapotranspiration (ET_o) of the period, the variation in leaf area, root density and the difference in leaf temperature between treatments. The third chapter proposes the use of punctual leaf temperature measurements in a leaf energy balance method to estimate guarana transpiration under full and deficit irrigation conditions. Sap flow was used to estimate the absorptivity of solar radiation from the leaf, a variable used in the energy balance. It can be concluded that the volume of wet soil has a great influence on the water dynamics for the crop, requiring care in localized irrigation during dry spells in humid regions. The leaf temperature associated with the leaf energy balance method allows estimating transpiration even with discontinuous measurements. The relationship between leaf area, sap flow and ET_o varied with plant development and there are differences in transpiration processes and sap flow in daily temporal scales, which can influence the efficiency of irrigation management since irrigation aims to

restore the water taken from the soil, which may not correspond to evapotranspired water in this interval.

Keywords: *water relations, water deficit, leaf temperature, leaf energy balance.*

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficientes da regressão linear para a carga e descarga da calibração do lisímetro, em que $Massa = sinal * a + b$	15
Tabela 2. Área foliar, fluxo de seiva e evapotranspiração de referência para os estádios fenológicos observados.	26
Tabela 3. Análise granulométrica do solo expressa em $g\ kg^{-1}$	38
Tabela 4. Parâmetros da equação de Van Genuchten.	39
Tabela 5. Manejo de irrigação para as três fases, considerando a percentagem do volume de solo irrigado.	40
Tabela 6. SFr para os quatro tratamentos divididos em intervalos de 3 dias.	46
Tabela 7. Densidade de raiz (vol. Raiz/ vol. Solo) dentro de cada compartimento para todos os tratamentos antes e depois da fase 3.	50
Tabela 8. Análise granulométrica do solo expressa em $g\ kg^{-1}$	58
Tabela 9. Parâmetros da equação de Van Genuchten.	58
Tabela 10. Análise da influência do horário e número de medições na estimativa da transpiração.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema do preenchimento e sistema de drenagem do reservatório.	13
Figura 2. A) Esquema dos sensores do fluxo de seiva para o método da dissipação de calor. B) Sondas de dissipação de calor instaladas. C) Revestimento de papel alumínio no formato de saia no seguimento do caule com as sondas.	16
Figura 3. A) Delimitação para o cálculo da área condutora da seção do caule e B) Relação entre diâmetro externo do caule e a área da seção condutora.	18
Figura 4. Reservatório com superfície coberta por lona plástica para calibração do método de Granier.	19
Figura 5. Associação do Guaranazeiros e bananeiras na Fazenda Bom Jardim.	20
Figura 6. Comparação entre a transpiração e a estimativa do fluxo de seiva com a equação original de Granier e com a equação ajustada para a cultura do guaranazeiro.	22
Figura 7. Curso do fluxo de seiva medido pelas sondas de dissipação e radiação solar global numa escala horaria durante quatro dias sequenciais de avaliação.....	23
Figura 8. A) Curso diário do Fluxo de seiva e Transpiração para os dois períodos estudados; B) Relação entre essas duas variáveis no período real; C) Relação entre essas duas variáveis com simulação de atraso da transpiração em um dia. Linhas cinzas paralelas representam os limites da incerteza do lisímetro.....	24
Figura 9. Curso da área foliar, da razão entre fluxo de seiva (SF) e evapotranspiração de referência (ET _o), da razão SF e Área Foliar (LA) e da razão entre as três variáveis no período de 21/10/20 a 17/04/21.	25
Figura 10. Relação entre a evapotranspiração de referência (ET _o), radiação solar global (R _g), déficit de pressão de vapor (VPD) e a razão entre Fluxo de Seiva e Área foliar (SF/LA), para plantas de guaraná em campo antes e após a poda.	27
Figura 11. Reservatórios com plantas jovens de guaraná.....	37
Figura 12. Formato da chapa de madeira usada na divisão do volume no reservatório (A) e instalação de divisórias nos reservatórios (B).	38
Figura 13. Esquema dos sensores do fluxo de seiva para o método da dissipação de calor.	41
Figura 14. Percentual do fluxo de seiva relativo e Evapotranspiração de referência durante a fase 3, em que, barras em cinza representam início e fim da fase 3.	45
Figura 15. Relação entre ET _o e SFr no período de estudo.	48

Figura 16. Relação do SFr com a ETo acumulada no período de estudo.	48
Figura 17. Diferença entre a temperatura foliar dos três tratamento em relação ao controle ao longo da fase 3.	51
Figura 18. Esquema dos sensores do fluxo de seiva para o método da dissipação de calor.	59
Figura 19. Fluxograma do cálculo da transpiração a partir do balanço de energia. .	62
Figura 20. Estrutura do guaranazeiro e condições dentro da casa de vegetação. ...	64
Figura 21. Média da diferença entre a temperatura da folha e do ar para os dois tratamentos e radiação global (Rg).	66
Figura 22. Relação entre a radiação global e a diferença de temperatura entre o ar e folha do tratamento controle.	66
Figura 23. Diferenças entre médias diárias de temperatura foliar do tratamento sem irrigação (T0) e o controle (T100).	66
Figura 24. Componentes do Balanço de energia no tempo.	67
Figura 25. Radiação global, fluxo de seiva e transpiração pelo BE do tratamento 100/100.	68
Figura 26. Evapotranspiração de referencia (ETo), fluxo de seiva (100/100) e transpiração média diária calculada pelo balanço de energia para os dois tratamentos.	68
Figura 27. Quociente entre a transpiração estimada pelo Balanço de energia e o fluxo de seiva no tempo.	69

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
OBJETIVOS	6
OBJETIVO GERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
CAPÍTULO I – FLUXO DE SEIVA DO GUARANAZEIRO (<i>Paullinia cupana</i>).....	10
RESUMO.....	10
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1. Estudo em ambiente protegido	13
2.1.1. Transpiração – medidas lisimétricas.....	14
2.1.2. Fluxo de seiva	15
2.2. Estudo em campo.....	19
3. RESULTADOS	21
3.2. Relação entre fluxo de seiva e transpiração.....	23
3.3. Fluxo de seiva e área foliar em campo	24
4. DISCUSSÃO	27
5. CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS.....	30
CAPÍTULO II - FLUXO DE SEIVA DO GUARANAZEIRO (<i>Paullinia Cupana</i>) SOB RESTRIÇÃO DE VOLUME DE SOLO MOLHADO.....	34
RESUMO.....	34
ABSTRACT	34
1. INTRODUÇÃO	35
2. MATERIAL E MÉTODOS	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45

4. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52
CAPÍTULO III - BALANÇO DE ENERGIA DA FOLHA NO GUARANAZEIRO (<i>Paullinia Cupana</i>)	55
RESUMO	55
ABSTRACT	55
1. INTRODUÇÃO	56
2. MATERIAL E MÉTODOS	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4. CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	71
CONCLUSÃO GERAL.....	74

INTRODUÇÃO GERAL

Guaraná é um fruto rico em cafeína, que é produzido pelas espécies *Paullinia cupana* H.B.K. *Typica* e *Paullinia cupana* variedade *sorbilis* (Mart.) Ducke. Conhecidas como guaranazeiro, são plantas nativas da Amazônia, da família das *Sapindáceas*, com 140 gêneros e cerca de 1.500 espécies conhecidas, entre as quais a lichia (*Litchi chinensis*) e o rambutan (*Nephelium lappaceum*) (TFOUNI et al., 2007; BOTANY, 2007; BUERKI et al., 2010). Naturalmente o guaranazeiro tem crescimento escandente, ou seja, se desenvolvendo em forma de um cipó ou liana até atingir o topo da floresta, quando cultivada em campo aberto tem a forma de arbusto, com no máximo três metros de altura (CAVALCANTE, 1979). Monóica e alógama, possui na mesma inflorescência flores femininas e masculinas que se abrem em dias diferentes, sendo assim, os insetos são os principais agentes polinizadores (VALOIS et al., 1979).

O Brasil é o único produtor comercial, abastecendo a indústria nacional e mundial (ATROCH & NASCIMENTO FILHO, 2018). Estima-se que em 2019 a área produtiva de guaraná no Brasil foi de aproximadamente 10 mil ha, sendo a Bahia o maior produtor, com cerca de 5,6 ha e 1.624 toneladas por ano, seguido pela Amazonas, com 3.954 ha e 858 toneladas (IBGE,2020). A diferença de produtividade, de 290 kg ha⁻¹ na Bahia e de 216 kg ha⁻¹ no Amazonas, pode ser atribuída às variedades tradicionais não melhoradas, a idade avançada dos guaranazais, a alta incidência de pragas e doenças e a falta de tratamentos culturais na região do Amazonas (ATROCH, 2000).

A cultura é, preferencialmente, cultivada em locais cuja temperatura média anual varia entre 23°C e 28°C, com precipitação anual variando entre 1.500 mm e 3.000 mm (COSTA & SOUZA, 1999; PEREIRA, 2005), levando ao guaraná a ser uma cultura adaptada a regiões com grande oferta de água durante todo o ano, não havendo nenhuma tentativa de melhoramento para a expansão da cultura para outras regiões.

A compreensão das relações hídricas das culturas tem grande importância, devido a possibilidade de fornecer subsídios úteis ao melhoramento da tolerância à seca (DAMATTA E RENA, 2001). Grande parte do volume de uma célula vegetal é água, geralmente cerca de 80 a 90 por cento do peso total

da planta. As plantas precisam de água para sustentar a estrutura celular, para funções metabólicas, para transportar nutrientes e para a fotossíntese. O solo tem a capacidade de armazenar água, sendo a principal fonte desse bem para as plantas terrestres. As raízes das plantas absorvem água do solo por meio dos pelos radiculares e a transportam até as folhas pelo xilema. À medida que o vapor d'água é perdido nas folhas, pelo processo de transpiração, é criada uma diferença de potencial que, atrai água das raízes, passando pela planta até as folhas, criando um fluxo, conhecido como fluxo de seiva (KIRKHAM, 2014). A perda da água pelas folhas é controlada principalmente pelos estômatos e, se não for compensada pelo fluxo de água do solo para a planta, resulta no murchamento das plantas (PASSIOURA, 2010).

É possível estimar o fluxo da seiva em um segmento do caule através de métodos baseados na dissipação térmica, que utilizam princípios físicos de transferência de calor, possibilitando a medição da transpiração da planta. Esses métodos podem ser divididos em três grupos: pulso de calor, que rastreia o movimento de um curto pulso de calor no fluxo de seiva; balanço de calor, que mensura o movimento da seiva, pelo transporte de calor, para fora de uma fonte de calor controlada; e dissipação térmica, que relata a dissipação do calor pelo fluxo de seiva por meio de uma relação empírica (SILVA, 2008).

Esses métodos são bastante utilizados na pesquisa, sendo possível encontrar resultados para diversas culturas, principalmente perenes, como coqueiro anão verde (ARAÚJO et al., 2012), citros (VELLAME et al., 2015), bananeira (HAIJUN et al., 2015), mangueira (COTRIM et al., 2019), macieira (BHUSAL et al., 2019), entre outras.

A metodologia da sonda de dissipação térmica desenvolvida por Granier (1985), também conhecida como método de Granier, é composta por duas agulhas de cerca de um a dois centímetros de comprimento, ambas equipadas com termopares, que são inseridas de forma axial ao caule, alinhadas verticalmente e separadas por uma distância vertical. A sonda superior, além de um termopar, possui uma resistência elétrica, que é aquecida continuamente a uma potência constante, enquanto a sonda inferior não é aquecida, atuando como uma sonda de referência.

Por conta dessa simplicidade e baixo custo, essa metodologia se tornou bastante popular (LU; URBAN; ZHAO, 2004). Porém, para que seja obtida uma

maior acurácia nos dados, é necessário um estudo mais aprofundado na calibração dos coeficientes da equação de Granier para cada espécie de planta estudada, além de formas para minimizar os potenciais erros, como perturbações térmicas externas que geram diferenças de temperatura ao longo do caule e a área efetiva do xilema condutora de seiva no caule (DELGADO-ROJAS et al., 2007; VELLAME et al., 2009).

O conhecimento da água que passa pela planta em junto a perda diretamente pelo solo, o conjunto conhecido como evapotranspiração, é a principal informação utilizada para o manejo da irrigação, pensando na reposição de água no solo. Assim, a lisimetria é considerada a metodologia de referência para determinação do consumo direto de água pelas plantas, entretanto, é um sistema considerado bastante complexo, delicado e caro, que pode apresentar problemas de representatividade e variados erros instrumentais, tornando sua utilização viável apenas em condições de pesquisa. (PEREIRA et al., 2013; VELLAME & SILVA, 2014).

Pensando em economia de água, o ideal é oferecer água através da irrigação apenas para o volume de solo onde há raízes e a planta possa absorver. A transpiração é o principal componente da evapotranspiração, principalmente quando se utiliza irrigação localizada, onde a irrigação é realizada em apenas uma parte do solo minimizando a evaporação do solo (VELLAME et al., 2009). Assim, a irrigação localizada é a mais utilizada na irrigação de fruteiras e culturas de grandes espaçamentos, por proporcionar o uso mais eficiente da água, devido à possibilidade de molhar apenas a área correspondente a raiz da planta. A adoção deste sistema de irrigação diminui a evaporação em solo exposto e dependendo das características dos emissores, podem-se obter diferentes porcentagens de área molhada (SOUZA et al., 2003).

Segundo Bernardo et al. (2005), o controle da área molhada depende do espaçamento, da vazão dos gotejadores, do tempo de aplicação de água e do tipo de solo. A área molhada pode tomar o formato de faixa molhada, mais comum quando se têm um espaçamento pequeno entre plantas, como nos cafezais ou hortaliças, ou pode tomar o formato de faixa não contínua, onde áreas específicas são molhadas, comum na irrigação em culturas muito espaçadas, como por exemplo fruteiras.

Para realizar a irrigação localizada é necessário conhecer como a planta pode ser afetada pela redução do volume de solo molhado. Alguns estudos, principalmente com citros, trazem bons resultados com pequenas áreas molhadas. Souza et al. (2003) estudaram a influência da porcentagem de área molhada na produção de lima ácida 'Tahiti'. Foi utilizada 15% de área molhada em curto, médio e longo períodos de estresse e foi concluído que a área molhada não afetou a produção, porém menores áreas molhadas geraram frutos com maior teor de sólido solúvel. Vellame et al. (2015) avaliaram os efeitos do molhamento parcial do solo sobre a transpiração e crescimento vegetativo de laranjeiras jovens. Foi utilizada uma área molhada mínima de 12,5% e foi percebida inicialmente uma redução na transpiração. Os autores observaram que após um período de 156 dias as plantas se aclimataram, devido à concentração de raízes na área irrigada, sem efeito no crescimento da parte aérea entre os tratamentos.

Algumas culturas apresentam problemas com a grande redução da área molhada. Coelho et al. (2016) observaram que uma maior área molhada da superfície do solo promove maior expansão do sistema radicular, maior área foliar, maior comprimento de frutos e maior produtividade em bananeira 'Grand Naine'. Aumentando a área molhada de amendoeiras, através da troca do sistema de irrigação de gotejo por microaspersão e mantendo a umidade do solo, Espadafor et al. (2018) observaram que houve aumento da transpiração e crescimento da copa com o aumento da área molhada. Esses autores concluem que a transpiração de amendoeiras pode ser limitada por um volume insuficiente de solo molhado, mesmo quando abastecido com um volume adequado de água, devido à alta resistência hidráulica em épocas de alta demanda evaporativa.

Cuidados com a déficits hídricos devem ser tomados, pois esses provocam alterações no comportamento vegetal, cuja irreversibilidade vai depender do genótipo, do estágio de desenvolvimento da planta e da duração e severidade do estresse (SILVA et al. 2012).

A redução da transpiração, em caso do secamento das raízes, pode ser causada pela produção de um hormônio vegetal, o ácido abscísico do xilema (ABA). O ABA é produzido nas raízes e é transportado pelo fluxo de água no xilema até a parte aérea para regular a abertura estomática (KANG & ZHANG, 2004). A redução da transpiração e conseqüentemente das trocas gasosas, por

conta do fechamento dos estômatos, causa a redução do resfriamento da superfície da folha e assim o aumento da temperatura do dossel vegetativo pela absorção da radiação incidente (JACKSON, 1982).

Essa relação entre a temperatura foliar e a transpiração, junto com o desenvolvimento de termômetros infravermelhos que facilitaram a medição da temperatura remotamente, levaram a vários pesquisadores a utilizar a diferença entre a temperatura do ar ambiente e da folha para identificar déficit hídrico. As metodologias evoluíram até o desenvolvimento de métodos de balanço de energia baseados na temperatura da copa e da superfície da folha, para estimar a evapotranspiração (FUCHS & TANNER, 1966; JACKSON, REGINATO & IDSO, 1977; SEGUIN & ITIER, 1983).

O balanço energético da folha inclui as trocas de calor sensível e latente com o ar, bem como os processos radiativos. As trocas de calor sensível e latente da folha com a atmosfera provêm principalmente da energia que vem da atmosfera sobre a terra, equilibradas a longo prazo pelas emissões de ondas longas da terra para o espaço (GUTSCHICK, 2016).

A tese foi dividida em três capítulos. O primeiro capítulo discute as incertezas relacionados à estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier e da transpiração obtida com lisímetro de pesagem e estabelece as relações entre a demanda hídrica da atmosfera com o fluxo de seiva e a área foliar do guaranazeiro em estágio produtivo. No segundo capítulo foi estudada a aclimação e o impacto da redução do volume molhado em plantas jovens de guaranazeiro. No terceiro capítulo propõe-se a utilização de medidas pontuais de temperatura foliar em um método de balanço de energia na folha para estimar a transpiração do guaraná em condição de irrigação plena e em déficit. Nesse método foi utilizado o fluxo de seiva para estimar a absorvidade da radiação solar da folha.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Estudar a dinâmica da água na cultura guaraná, a fim de compreender os mecanismos de aclimatação da cultura exposta a déficit hídrico e redução do volume de solo molhado, visando subsidiar o manejo e planejamento da irrigação.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estabelecer as relações entre a demanda hídrica da atmosfera com o fluxo de seiva, a área foliar e as fases fenológicas do guaranazeiro.

Estudar a aclimatação do guaranazeiro submetido a redução do volume molhado de solo.

Estimar a transpiração do guaranazeiro através do balanço de energia da folha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, M. C.; ESTEVES, B. D. S.; SOUSA, E. F. de. Método de dissipação térmica para determinação do fluxo de seiva em coqueiro anão-verde. **Bragantia**, Campinas, v.71, n.4, p.558-562, nov., 2012.
- ATROCH, A. L. Situação atual da cultura do guaraná no Estado do Amazonas. **EMBRAPA-Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental (Manaus, AM)**, v. 1, 2000.
- ATROCH, A. L.; DO NASCIMENTO FILHO, F. J. Guarana—*Paullinia cupana* Kunth var. *sorbilis* (Mart.) Ducke. In: **Exotic Fruits**. Academic Press, 2018. p. 225-236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00029-0>
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação. 7 ed. Viçosa: Editora UFV**, 2005. v. 1. 611 p.
- BHUSAL, N.; HAN, S.; YOON, T. Impact of drought stress on photosynthetic response, leaf water potential, and stem sap flow in two cultivars of bi-leader apple trees (*Malus domestica* Borkh.). **Scientia Horticulturae**, v. 246, p. 535-543, 2019.

- BOTANY. Sapindaceae. Disponível em: <<http://www.botany.hawaii.edu/faculty/carr/sapind.htm>> Acessado em: 05/11/2022.
- BUERKI, S.; FOREST, F.; SALAMIN, N.; ALVAREZ, N. Comparative performance of supertree algorithms in large data sets using the soapberry family (Sapindaceae) as a case study. **Systematic Biology**, v. 60, n. 1, p. 32-44, 2010.
- CAVALCANTE, P. B. **Frutas Comestíveis da Amazônia 3**. 1979.
- COELHO, E. F.; DOS SANTOS, M. R.; DA COSTA, E. L.; DONATO, S. L. R.; OLIVEIRA, P. M. Irrigation under different soil surface wetted areas and water depths for banana cv. Grand Naine. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 36, p. 3425-3432, 2016.
- COTRIM, C. E.; SANTOS, M. R. D.; COELHO, E. F.; SILVA, J. A. D. Sap flow in 'Tommy Atkins' mango trees under regulated deficit irrigation. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 3, 2019.
- COSTA, R. S. C.; SOUZA, V. Recomendações técnicas sobre o cultivo de guaranazeiro. **Embrapa Rondônia-Recomendação Técnica (INFOTECA-E)**, 1999.
- DAMATTA, F. M.; RENA, A. B. Tolerância do café à seca. **Tecnologias de produção de café com qualidade**, p. 65-100, 2001.
- Delgado-Rojas, J. S.; Angelocci, L. R.; Folegatti, M. V.; Coelho Filho, M. A. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 404-413, 2007.
- ESPADAFOR, M.; ORGAZ, F.; TESTI, L.; LORITE, I. J.; GARCÍA-TEJERA, O.; VILLALOBOS, F. J.; FERERES, E. Almond tree response to a change in wetted soil volume under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 202, p. 57-65, 2018.
- FUCHS, M.; TANNER, C. B. Infrared thermometry of vegetation 1. **Agronomy journal**, v. 58, n. 6, p. 597-601, 1966.
- GRANIER, A. 1985. A new method of sap flow measurement in tree stems. **Ann. Sci. For.** 42:193–200.
- GUTSCHICK, V. P. Leaf energy balance: basics, and modeling from leaves to canopies. in: **Canopy photosynthesis: From basics to applications**. Springer, Dordrecht, 2016. p. 23-58.

- HAIJUN, L.; COHEN, S.; LEMCOFF, J. H.; ISRAELI, Y.; TANNY, J. Sap flow, canopy conductance and microclimate in a banana screenhouse. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 201, p. 165-175, 2015.
- IBGE. Série histórica da estimativa anual da área plantada, área colhida, produção e rendimento médio dos produtos das lavouras. **IBGE**, 2020. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>.> Acesso em: 05/11/2022.
- JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. **Water resources research**, 13(3), 651 -656, 1977.
- JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress in: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982, p. 43-45.
- KANG, S.Z.; ZHANG, J.H. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. **Journal of experimental botany**, v. 55, n. 407, p. 2437-2446, 2004.
- KIRKHAM, M.B. **Principles of soil and plant water relations**. Academic Press, 2014.
- LU, P.; URBAN, L.; ZHAO, P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. **ACTA BOTANICA SINICA-ENGLISH EDITION**-, v. 46, n. 6, p. 631-646, 2004.
- PASSIOURA, J. B. Plant–water relations. **e LS**, 2010.
- PEREIRA, J. C. R. Cultura do guaranazeiro no Amazonas. **Embrapa Amazônia Ocidental**. Sistemas de Produção, 2005.
- PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; NOVA, N. A. V. Evapotranspiração. Campinas: Ie,Fundag, 2013. 323 p.
- SEGUIN, B.; ITIER, B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 4, n. 2, p. 371-383, 1983.
- SILVA, M. G. **Desenvolvimento de sensor de fluxo de seiva e de coeficiente indicador de estresse hídrico para plantas de cafeeiro arábica**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 102p, 2008.

- SILVA, M. R.; MARTIN, T. N.; ORTIZ, S.; BERTONCELLI, P.; VONZ, D. Desempenho agrônômico de genótipos de milho sob condições de restrição hídrica. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 202-212, 2012.
- SOUZA, M. J.; RAMOS, M. M.; DE SIQUEIRA, D. L.; COSTA, L. C.; LHAMAS, A. J.; MANTOVANI, E. C.; SALOMÃO, L. C. Produção e qualidade dos frutos da limeira da limeira ácida 'T a ácida 'T a ácida 'Tahiti'submetida ahi't submetida a diferentes porcentagens de área molhada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 245-250, 2003.
- TFOUNI, S. A. V.; CAMARGO, M. C. R.; VITORINO, S. H. P.; MENEGÁRIO, T. F.; TOLEDO, M. C. D. F. Contribuição do guaraná em pó (*Paullinia cupana*) como fonte de cafeína na dieta. **Revista de Nutrição**, 2007.
- VALOIS, A. C.; CORRÊA, M. P.; DA COSTA VASCONCELLOS, M. E. Estudo de caracteres correlacionados com a produção de amêndoa seca no guaranazeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 14, n. 2, p. 175-179, 1979.
- VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 516-523, 2009.
- VELLAME, L. M.; SILVA, A. J. Sistema Solo-Água-Planta-Atmosfera e Manejo da Irrigação em Plantas Perenes. In: José Antonio Frizzone; Francisco de Souza, Sílvio Carlos; Ribeiro Vieira Lima; Hans Raj Gheyj; Claudivan Feitosa de Lacerda. (Org.). **INOVAGRI Book - Irrigation and Salinity: Researches and Technological Innovations**. 1ed. Fortaleza: INOVAGRI, 2014, v. p. 149-160. 2014.
- VELLAME, L. M.; JÚNIOR, F.; FELISBINO, E.; COELHO, R. D. Effect of partial soil wetting on transpiration, vegetative growth and root system of young orange trees. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 5, p. 377-384, 2015.

CAPÍTULO I – FLUXO DE SEIVA DO GUARANAZEIRO (*Paullinia cupana*)

RESUMO

O trabalho teve como objetivo estabelecer as relações entre a demanda hídrica da atmosfera, e a área foliar do guaranazeiro com o fluxo de seiva. Os estudos foram realizados em condições de ambiente protegido e em campo. Um experimento foi conduzido em casa de vegetação, com uma planta jovem de guaranazeiro transplantada em reservatório de 0,5 m³. Foi utilizado uma plataforma de 1.000kg de capacidade como lisímetro para a estimativa da transpiração e sonda de dissipação térmica para o fluxo de seiva. Mediram-se a radiação solar global, a temperatura e a umidade do ar no interior da casa de vegetação. Nos estudos de campo foram instaladas sondas de fluxo de seiva em uma planta de uma unidade produtora localizada na Fazenda Bom Jardim, no município de Taperoá – Bahia. Na proximidade foi instalada uma estação meteorológica automatizada equipada com termohigrômetro, piranômetro, pluviômetro e anemômetro. Foram realizadas avaliações biométricas em quatro momentos: dia 21/10/20 - instalação da instrumentação de campo, dia 08/02/21 - antes e após a poda da cultura e dia 17/04/21- retirada dos instrumentos. A média do fluxo de seiva da planta em campo para os estádios de florescimento e frutificação antes da poda foram, respectivamente, 3,43 e 3,78 L dia⁻¹, no crescimento vegetativo foi de 1,96 L dia⁻¹ e logo após a poda 10,38 L dia⁻¹. Foram identificadas defasagens temporais entre o fluxo de seiva e a radiação global e entre o fluxo de seiva e a transpiração. As relações entre área foliar, fluxo de seiva, evapotranspiração de referência e déficit de pressão de vapor variaram com o desenvolvimento da planta e estado da copa. Modelos que não consideram essas condições em conjunto podem apresentar erros consideráveis na determinação do consumo de água pelas plantas.

PALAVRAS-CHAVE: lisímetro, dissipação de calor, método de Granier.

ABSTRACT

The objective of this work was to establish the relationships between the water demand of the atmosphere and the sap flow and the leaf area of the guarana tree. The studies were carried out in protected environment conditions and in the field. An experiment was carried out in a greenhouse, with a young

guarana plant transplanted into a 0.5 m³ reservoir. A 1,000 kg capacity platform was used as a lysimeter to estimate transpiration and a thermal dissipation probe for sap flow. Were measured global solar radiation, temperature and air humidity inside the greenhouse. In the field studies, sap flow probes were installed in a plant of a production unit located at Fazenda Bom Jardim, in the municipality of Taperoá - Bahia. An automated meteorological station equipped with a thermo-hygrometer, pyranometer, pluviometer and anemometer was installed nearby. Biometric evaluations were carried out in four moments: 1. installation of field instrumentation (21/10/20), 2 and 3. before and after pruning the crop (08/02/21) and 4. removal of instruments (17/ 04/21). The average sap flow of the plant in the field for the flowering and fruiting stages before pruning were, respectively, 3.43 and 3.78 L day⁻¹, in vegetative growth was 1.96 L day⁻¹ and right after pruning was 10.38 L day⁻¹. Time lags were identified between sap flow and global radiation and between sap flow and transpiration. The relationships between leaf area, sap flow, reference evapotranspiration and vapor pressure deficit varied with plant development and crown condition. Models that do not consider these conditions together may present considerable errors in the determination of water consumption by plants.

KEYWORDS: *lysimeter, heat dissipation, Granier method.*

1. INTRODUÇÃO

Guaraná é um fruto rico em cafeína, que é produzido pelas espécies *Paullinia cupana H.B.K. Typica* e *Paullinia cupana variedade sorbilis (Mart.) Ducke*. Conhecidas como guaranazeiro, são plantas nativas da Amazônia, da família das *Sapindáceas*, com 140 gêneros e cerca de 1.500 espécies conhecidas, entre elas a lichia (*Litchi chinensis*) e o rambutan (*Nephelium lappaceum*) (TFOUNI et al., 2007; BUERKI et al., 2010). O cultivo do guaranazeiro está se expandindo para demais estados do país, sendo atualmente o estado da Bahia o maior produtor de guaraná (IBGE, 2020). No entanto, o seu cultivo está limitado as condições ambientais, principalmente ao déficit hídrico. Um dos motivos dessa limitação é a carência de estudos relacionados à demanda de água dessa cultura o que é essencial para o planejamento do cultivo e manejo da irrigação.

A ciência vem evoluindo no que diz respeito aos processos de transferência e armazenamento de água na planta. Já é possível estimar o fluxo da seiva em um segmento do caule através de métodos que utilizam princípios físicos de transferência de calor, possibilitando a estimativa do fluxo de seiva em escalas horárias. A metodologia da sonda de dissipação térmica desenvolvida por Granier (1985) se baseia na relação entre a velocidade de dissipação de calor no caule com o fluxo de seiva. Por conta dessa simplicidade e baixo custo, essa metodologia se tornou bastante popular (LU; URBAN; ZHAO, 2004). Porém, diversos estudos demonstram a necessidade da calibração para cada espécie de planta estudada, além de formas para minimizar os potenciais erros, como perturbações térmicas externas que geram diferenças de temperatura ao longo do caule e a estimativa da área efetiva do xilema condutora de seiva no caule (DELGADO-ROJAS et al., 2007; VELLAME et al., 2009).

Apesar de o fluxo de seiva ser utilizado para estimativa da transpiração, existem diferenças temporais entre esses dois processos, sejam diferenças temporais ligada ao movimento, gerando um atraso da transpiração em relação ao fluxo de seiva, ou diferenças volumétricas ligadas ao armazenamento na planta (ALARCÓN et al., 2000; PAUDEL et al., 2015).

O fluxo de seiva é sensível a diversas variáveis relacionadas ao solo, clima e planta, como tensão da água no solo (DODD, 2008) radiação solar (MARINHO et al., 2013), déficit de pressão de vapor (VPD) (LIU et al., 2015), área foliar da copa (SANTOS et al., 2021), entre outros.

Esse trabalho teve como objetivo estabelecer as relações entre a demanda hídrica da atmosfera, a transpiração, o fluxo de seiva, a área foliar e as fases fenológicas do guaranazeiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram realizados em condições de ambiente protegido e em campo. Em ambiente protegido avaliou-se o método de Granier por meio de comparação com medidas lisimétricas. Em campo foi estudado o fluxo de seiva em plantas adultas, observando as relações com a demanda hídrica atmosférica, fase fenológica e área foliar.

2.1. Estudo em ambiente protegido

O experimento foi conduzido em casa de vegetação com cobertura plástica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Município de Cruz das Almas, BA (12° 48' S; 39° 06' O; 225 m de altitude). Segundo a classificação de Köppen, avaliado por Alvares et al. (2013), o clima é tipo tropical quente e úmido (Af), sem estação seca definida. A precipitação média é de 1.224 mm por ano, com média anual da umidade relativa do ar acima de 82% e temperatura média de 24,5° C.

A muda do guaranazeiro utilizada no experimento foi oriunda de sementes de plantas selecionadas quanto a resistência a fitopatologias, tamanho das sementes e cacho (racemo) com frutos fecundados e facilidade de colheita manual pela retirada do cacho da planta quando atinge o ponto de colheita. Após 9 meses, a muda de guaraná com 6 folhas definitivas foi transplantada para o reservatório definitivo.

Foi utilizado um reservatório de 0,5 m³ preenchidos com material da camada de 0-0,20 m de Latossolo Amarelo Distrocoeso e peneirado com malha de 0,005 m. A camada superior do reservatório, de 0,15 m de espessura, recebeu uma mistura com proporção de 1/6 de esterco bovino (v/v), como matéria orgânica. O sistema de drenagem constitui-se de uma camada de brita com 0,08 m de espessura, 0,01 m de areia lavada e uma tela de nylon separando essas duas camadas, sendo a água drenada por um orifício 0,025 m na parte inferior do reservatório (Figura 1).

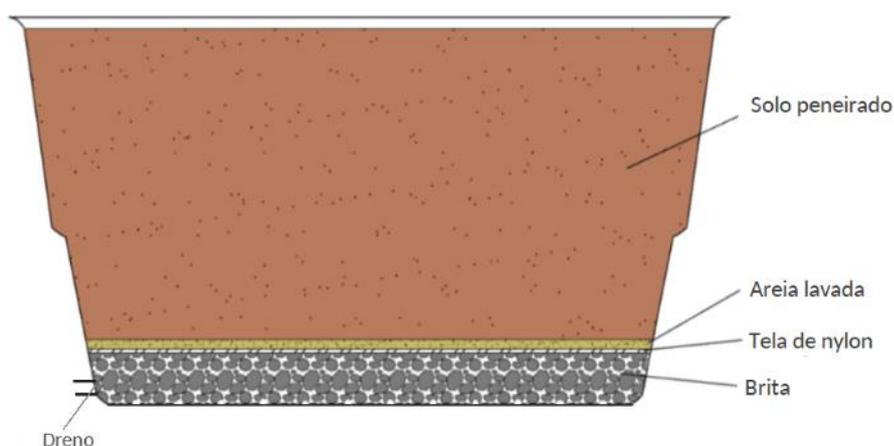


Figura 1. Esquema do preenchimento e sistema de drenagem do reservatório.

2.1.1. Transpiração – medidas lisimétricas

O reservatório foi posicionado sobre uma plataforma de pesagem com capacidade de 1.000 kg (modelo AZ-9090-1T - Alfa Instrumentos), exercendo a função de lisímetro de pesagem. Essa plataforma foi conectada a um datalogger CR800 da Campbell SCi em associação com um multiplexador AM 16/32B também da Campbell SCi. A calibração foi realizada através de três ciclos de carga e descarga com massas conhecidas, em um horário de baixa influência da temperatura. A equação de calibração para a plataforma de pesagem foi ajustada por meio de regressão linear, relacionando os valores de saída das células de carga, em milivolt por volt ($mV V^{-1}$) de excitação e a massa (kg). Os coeficientes da equação de calibração e o coeficiente de determinação estão apresentados na Tabela 1. Coeficientes da regressão linear para a carga e descarga da calibração do lisímetro, em que $Massa = sinal * a + b$. Os erros mínimo e máximo encontrados foram -0,625 e 0,664 kg, respectivamente, com o erro médio absoluto (MAE) de 0,226 kg. A incerteza de cada medição encontrada na calibração com 95% de probabilidade foi calculada pela Equação 1 de acordo com metodologia empregada por Amaral et al., 2018, apresentando um valor de 0,232 kg

$$I = \frac{S}{\sqrt{n}} * t \quad (1)$$

Em que:

I - incerteza expandida (kg);

S – desvio padrão das medições (kg);

t – coeficiente de Student para 95% de confiabilidade (1.796);

n – número de medições;

Tabela 1. Coeficientes da regressão linear para a carga e descarga da calibração do lisímetro, em que $Massa = sinal \cdot a + b$.

Carga			Descarga		
a	b	R ²	a	b	R ²
890,37	-105,56	0,9999	890,28	-105,37	0,9999

Para este estudo, a superfície do solo dos lisímetros foi recoberta com plástico para evitar perdas por evaporação do solo, computando apenas a transpiração da planta. O cálculo da transpiração foi realizado através diferença de massa do sistema, da meia-noite de um dia e a meia-noite do dia seguinte, totalizando 24 horas. A incerteza da diferença entre esses dois momentos (transpiração) foi calculada pela equação 2 (AMARAL et al., 2018) e apresentou um valor de 0,328 kg.

$$I_{ET} = \sqrt{I_i^2 + I_{i-1}^2} \quad (2)$$

Em que:

I_{ET} – incerteza combinada de duas médias em momentos diferentes (kg).

I_i – incerteza da medição do dia atual (kg).

I_{i-1} – incerteza da medição do dia anterior (kg).

2.1.2. Fluxo de seiva

Os sensores de fluxo de seiva foram compostos por uma sonda de aquecimento e por uma sonda de referência (Figura 2A). As sondas foram construídas no Laboratório de Instrumentação Agrícola, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRB. Foram utilizadas agulhas de 0,001 m de diâmetro e 0,01 m de comprimento. As sondas aquecedoras tiveram a agulha envolvida por um fio de constantan, que foi utilizada como resistência para gerar calor e ambas as sondas tiveram em seu interior um termopar feito pela união de fios de cobre e constantan, ambos com 0,0005 m de diâmetro.

Para instalar as sondas, foram feitos 2 furos em direção radial, alinhados verticalmente e distanciados em 0,08 m, com o comprimento igual ao das sondas

e um diâmetro ligeiramente maior. Para melhorar a condução de calor, as sondas foram revestidas com pasta térmica antes de serem inseridas (Figura 2B). Por fim, foi efetuado um revestimento com papel alumínio em forma de saia, para reduzir o efeito térmico do exterior no seguimento do caule (Figura 2C).

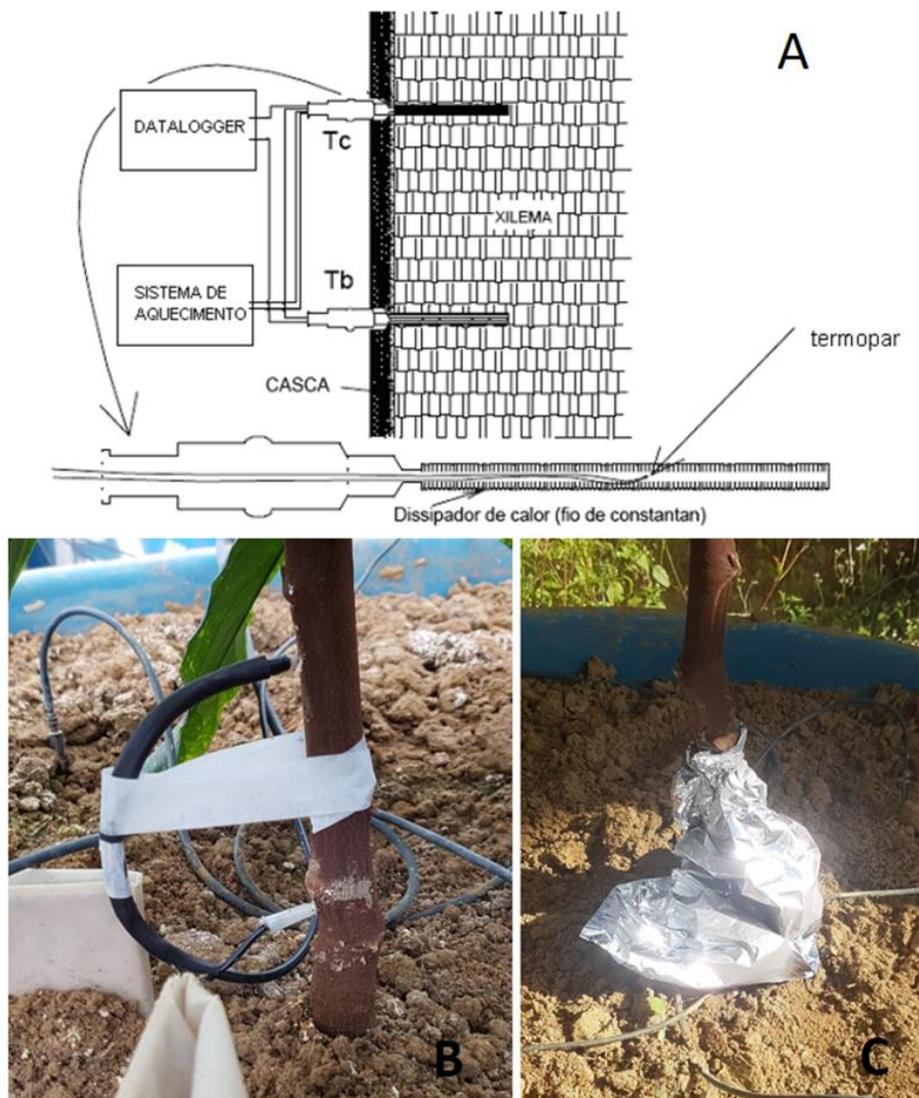


Figura 2. A) Esquema dos sensores do fluxo de seiva para o método da dissipação de calor. B) Sondas de dissipação de calor instaladas. C) Revestimento de papel alumínio no formato de saia no seguimento do caule com as sondas.

Para a coleta de dados das sondas de Granier utilizou-se o mesmo sistema do lisímetro. No sistema de aquecimento foram utilizadas placas controladoras de tensão desenvolvidas com a plataforma Arduino, as quais mantêm a potência aplicada nas sondas de aquecimento em $0,1 \text{ W cm}^{-1}$,

calculado através da voltagem aplicada e resistência elétrica das sondas, durante 24 horas por dia.

Para minimizar os efeitos das diferenças térmicas naturais (DTN) sobre as sondas, foi instalado mais um sensor de fluxo de seiva em uma planta de guaranazeiro próxima a do lisímetro, a qual não foi medido o fluxo, esta teve o aquecimento desligado durante todo o experimento e serviu de conjunto de referência. O aquecimento da sonda da planta do lisímetro também foi desligado por um período de 48 horas. Assim, foram medidas as diferenças térmicas entre as duas sondas sem aquecimento e a partir daí foi gerado uma equação de estimativa da variação dos DTN da planta do lisímetro por meio de regressão em função da variação do conjunto de referência, o qual foi denominado como diferenças térmicas naturais estimadas (DTNe).

Posteriormente, os dados de diferença de temperatura obtidos foram corrigidos com base nessas estimativas, através da seguinte equação (Equação 3).

$$\Delta T = \Delta Tm - DTNe \quad (3)$$

Em que:

ΔT – diferença térmica corrigida, °C;

ΔTm – diferença térmica medida pela sonda, °C;

$DTNe$ – diferença térmica natural estimada, °C.

A determinação da área condutora na seção do caule foi realizada através do corte de vários ramos de diferentes espessuras e com o auxílio do software computacional AutoCAD foi delimitado a área condutora (Figura 3A) e calculado seu valor em cm². Por fim, através de regressão foi obtida uma equação que relaciona o diâmetro externo do caule com sua área condutora (Figura 3B).

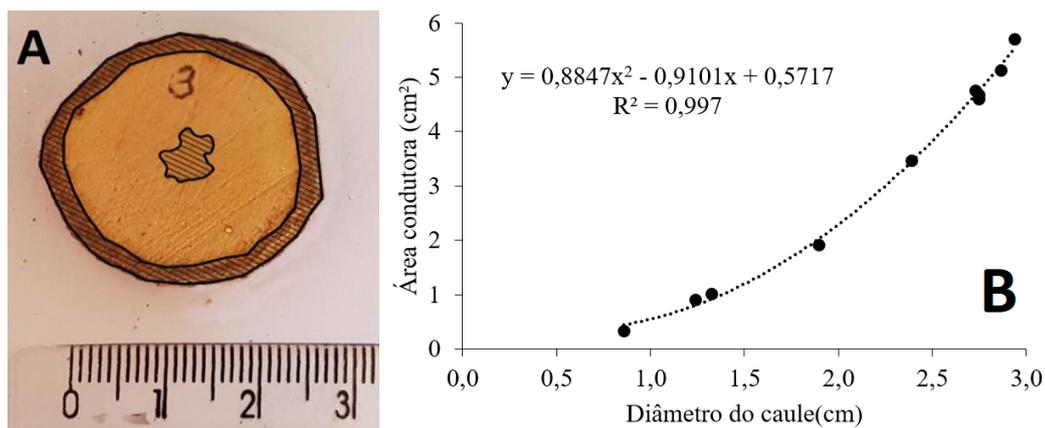


Figura 3. A) Delimitação para o cálculo da área condutora da seção do caule e B) Relação entre diâmetro externo do caule e a área da seção condutora.

Foi utilizada a equação de Granier (1985), Equação 4, para estimativa do fluxo de seiva (SF).

$$SF = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{\frac{1}{\beta}} A_s \quad (4)$$

Em que:

ΔT_{max} – diferença de temperatura a fluxo zero, quando somente ocorre perda de calor por condução, °C;

ΔT – diferença de temperatura entre as duas sondas, °C;

A_s – área da seção condutora, m²;

$1/\beta$ – constante empírica calibrada por Granier (1,231);

$1/\alpha$ – constante de ajuste empírico para a cultura, m s⁻¹.

O coeficiente de potência ($1/\beta$) foi mantido da equação original de Granier (1,231), devido à pouca variação entre as espécies quanto as propriedades de troca térmica em meio poroso (FERNÁNDEZ et al., 2006; COELHO et al., 2012). O ajuste do coeficiente angular ($1/\alpha$) da equação de Granier foi feito a partir dos dados de transpiração obtida com o lisímetro e do fluxo de seiva calculado através das variações de temperatura das sondas, ambos em escala diária, de maneira a minimizar o erro absoluto entre eles.

Para que o lisímetro registrasse apenas a transpiração do sistema, o reservatório teve sua superfície coberta com uma lona plástica durante os dois momentos da calibração (Figura 4), os quais foram realizados em outubro de 2020 e dezembro de 2020, para obter diferenças de desenvolvimento da cultura e maior diversidade de valores de transpiração.



Figura 4. Reservatório com superfície coberta por lona plástica para calibração do método de Granier.

O coeficiente angular ($1/\alpha$) obtido para a cultura, 266×10^{-6} , está dentro do intervalo de valores encontrados na literatura, 103×10^{-6} para atemoia (SANTOS et al., 2020) e 594×10^{-6} para laranja (VELLAME et al., 2012).

2.2. Estudo em campo

Foram instaladas sondas de fluxo de seiva em uma planta de uma unidade produtora localizada na Fazenda Bom Jardim, no município de Taperoá – Bahia, cuja latitude $13^{\circ} 33' 01''$ S, longitude $39^{\circ} 11' 32''$ W e altitude de 141 m. Segundo a classificação de Köppen, avaliada por Alvares et al. (2013), o clima é tipo tropical sem estação seca (Af). A temperatura média anual é de $24,6^{\circ}\text{C}$ com

temperatura média no mês de fevereiro, mês mais quente, de 26,1 °C e precipitação pluviométrica média anual de 2082 mm.

A área era cultivada com plantas jovens de guaraná, transplantadas em julho de 2018, em cultivo convencional a pleno sol. As mudas de guaraná foram propagadas por sementes. O espaçamento adotado foi de 3,0 m entre plantas e 6,0 m entre fileiras de plantas, consorciadas com bananeira espaçada de 3,0 x 6,0 m. A área possui 800 plantas de guaraná, totalizando 1,5 ha, com terreno apresentando declividade de 25% (Figura 5).



Figura 5. Associação do Guaranazeiros e bananeiras na Fazenda Bom Jardim.

Na proximidade foi instalada uma estação meteorológica automatizada equipada com termohigrômetro, piranômetro, pluviômetro e anemômetro. 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 foram lidos diretamente pela placa Arduino. Para a leitura do sinal analógico do sensor de radiação, utilizou-se o conversor A/D HX711 de 23 bits (resolução de 2,38 nV).

Foram realizadas avaliações biométricas em quatro momentos:

1. Na instalação da instrumentação de campo (21/10/20);
2. antes da poda da cultura (08/02/21);
- 3 após a poda da cultura (08/02/21);
4. na retirada dos instrumentos (17/04/21).

Para a avaliação foi medido o diâmetro no caule, considerando a média de 3 medidas realizadas em uma altura média entre as duas sondas do fluxo de seiva, com o auxílio de um paquímetro.

A área foliar (LA) foi medida realizando-se a contagem do número de folíolos e medindo o comprimento e largura de 20% dos folíolos. Vellame (2010) com a amostragem de 14,29% para citros, indicou um erro menor que 5% na estimativa da área foliar. Através da Equação 5 foi calculada a área foliar média da planta, cujo coeficiente foi ajustado através de regressão de dados de altura e largura medidos com régua e de área foliar através do escaneamento de folhas. Essa área média é multiplicada pelo número de folíolos para obter a área foliar total da planta.

$$LA = 0,6932 C L \quad (R^2=0,978) \quad (5)$$

Em que:

LA - área foliar (m²);

C - Comprimento da folha (m);

L - Largura da folha (m);

3. RESULTADOS

Na Figura 6 pôde-se observar a relação entre a transpiração medida pelo lisímetro e o fluxo de seiva estimado tanto pela equação de Granier, quanto pela equação ajustada para a cultura do guaraná. Diversos autores observaram a subestimativa do fluxo de seiva com o uso do coeficiente original da equação de Granier (0,000119), mostrando a importância do ajuste do coeficiente angular da equação de Granier para a cultura (VELLAME et al., 2009; MARINHO et al., 2013; SÉRVULO et al., 2017).

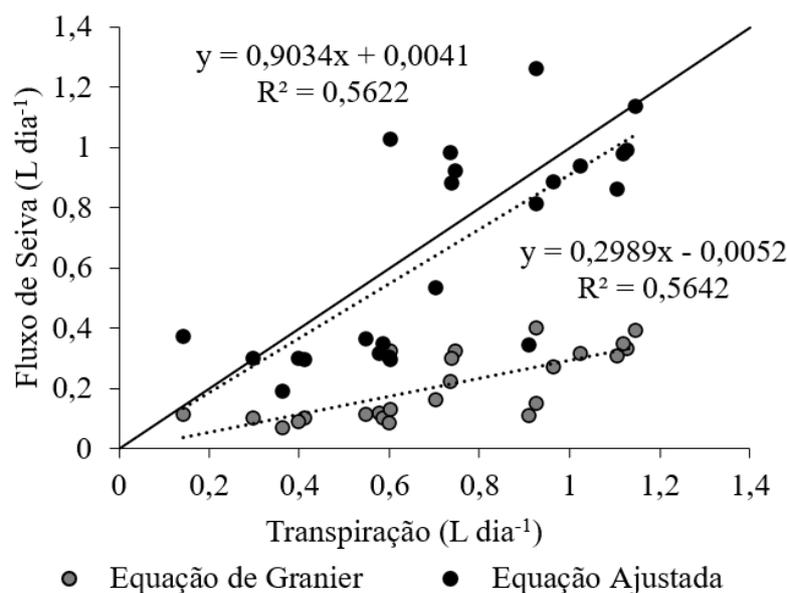


Figura 6. Comparação entre a transpiração e a estimativa do fluxo de seiva com a equação original de Granier e com a equação ajustada para a cultura do guaranazeiro.

O curso do fluxo de seiva (SF) medido pelas sondas de dissipação e radiação solar global (Rg) durante quatro dias sequenciais de avaliação pode ser observado na Figura 7. Foi visível uma forte relação entre as duas variáveis, porém, foi possível notar uma defasagem temporal entre elas, de forma que o SF normalmente se inicia um curto período após o início da Rg e ao final do dia. Mesmo não havendo mais suprimento energético, o SF se manteve por um período de aproximadamente duas horas. Esse fenômeno, entretanto, não foi constante e variou em amplitude e duração em diferentes dias.

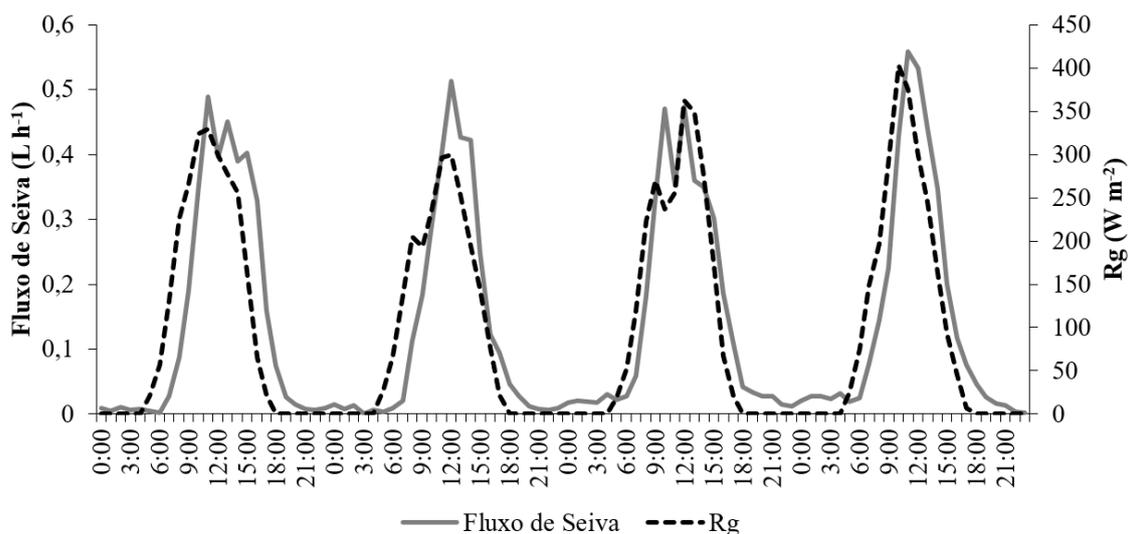


Figura 7. Curso do fluxo de seiva medido pelas sondas de dissipação e radiação solar global numa escala horária durante quatro dias sequenciais de avaliação.

3.2. Relação entre fluxo de seiva e transpiração

Na Figura 8 podem ser observados o fluxo de seiva e transpiração numa escala diária para os dois períodos estudados (Figura 8A) e a relação entre essas duas variáveis (Figura 8B). Foi possível observar que a maior parte dos dados (87%) estiveram dentro da margem de incerteza na estimativa da transpiração pelo lisímetro (0,328 kg). Observando o curso das duas variáveis, foram observadas diferenças que, além das incertezas instrumentais, podem ser causadas por diferenças temporais entre as variáveis.

Para testar a existência de uma defasagem temporal, foi realizada uma simulação de atraso de um dia da transpiração, o que causou uma melhoria na paridade do curso diário entre as duas variáveis. Houve uma inversão de subestimativa da transpiração em relação ao fluxo de seiva de 9,2% para uma superestimativa de 5,6%. Com esse atraso de um dia o coeficiente de determinação aumentou de 0,562 para 0,741 e o coeficiente angular da linha de tendência ficou mais próximo de 1 (1,06) (Figura 8C).

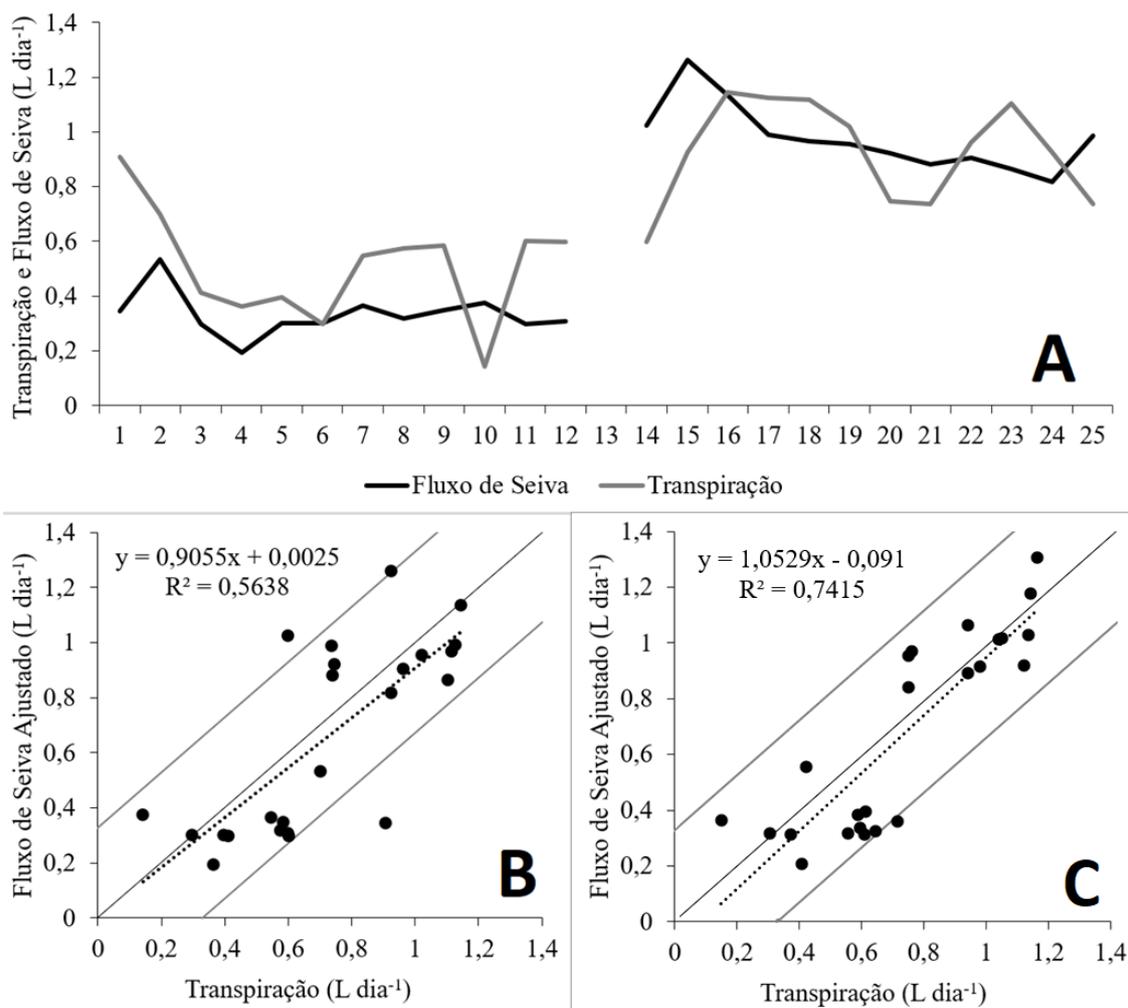


Figura 8. A) Curso diário do Fluxo de seiva e Transpiração para os dois períodos estudados; B) Relação entre essas duas variáveis no período real; C) Relação entre essas duas variáveis com simulação de atraso da transpiração em um dia. Linhas cinzas paralelas representam os limites da incerteza do lisímetro.

3.3. Fluxo de seiva e área foliar em campo

Antes da poda foram observadas relações constantes entre o fluxo de seiva (SF), a evapotranspiração de referência (ET_o) e área foliar LA nos estádios de florescimento e frutificação. Após a poda houve uma queda instantânea, seguida por um comportamento de crescimento em todas as relações, em que não foi observado pico e queda apenas para relação SF/ET_o (Figura 9).

Apesar da redução de 46% da área foliar da poda, foi observada uma redução instantânea de 29% na relação SF/ET_o, 37% na relação SF/ET_o/LA e 45% na relação SF/AF, com um pico de 398% dois meses após a poda, seguido por uma queda.

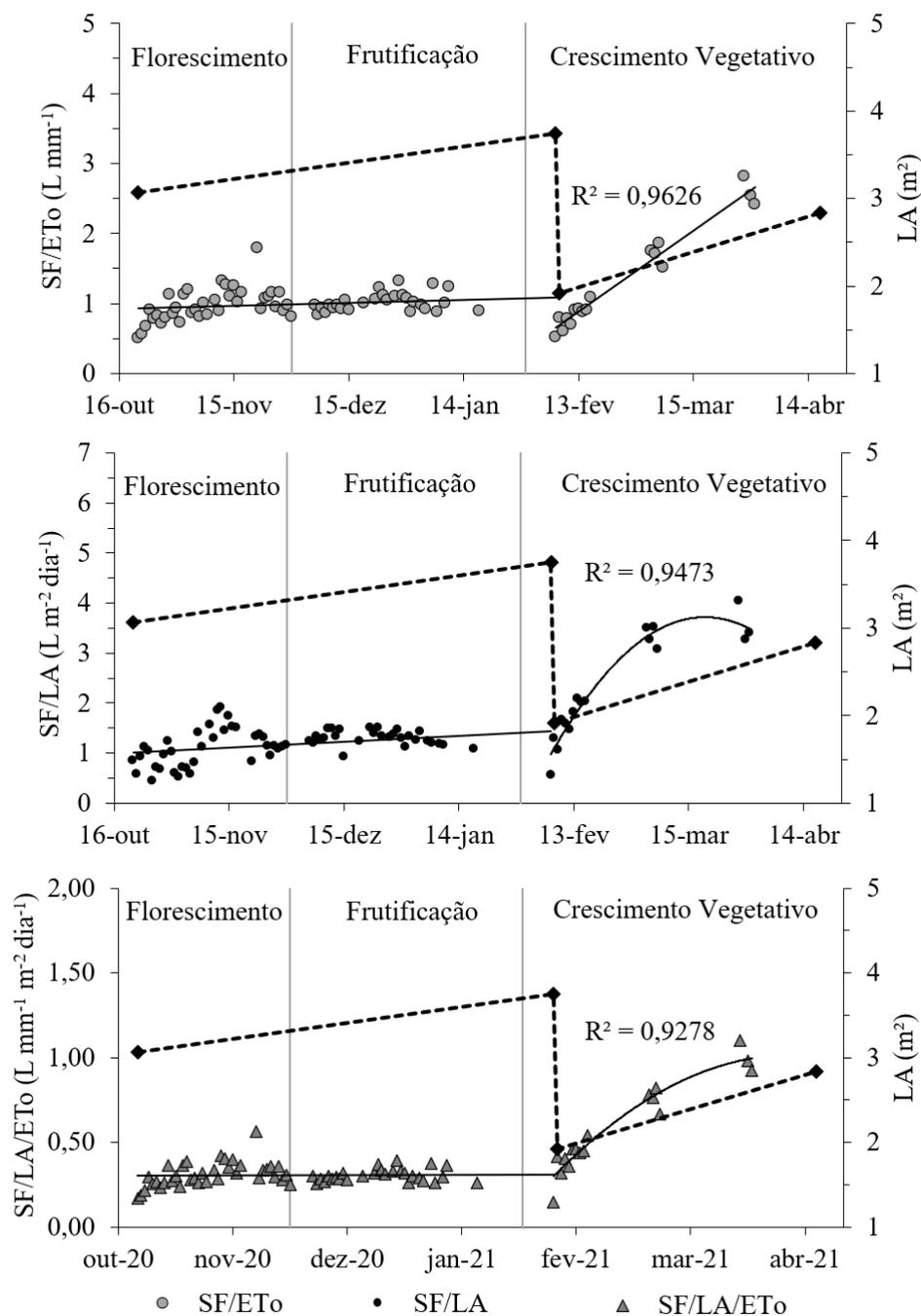


Figura 9. Curso da área foliar, da razão entre fluxo de seiva (SF) e evapotranspiração de referência (ETo), da razão SF e Área Foliar (LA) e da razão entre as três variáveis no período de 21/10/20 a 17/04/21.

Na Tabela 2 estão apresentadas as médias e intervalos de cada variável separadamente para os três estádios fenológicos.

Tabela 2. Área foliar, fluxo de seiva e evapotranspiração de referência para os estádios fenológicos observados.

Estádio Fenológico	LA (m²)	SF (L dia⁻¹)	SF/LA (L m⁻² dia⁻¹)	ET_o (mm dia⁻¹)
Florescimento	3,147	3,427	1,085	3,520
Frutificação	3,384	3,784	1,119	3,508
Crescimento Vegetativo	1,917 a 3,547	1,965 a 10,382	0,554 a 2,632	3,604

*LA – área foliar; SF – fluxo de seiva; ET_o – evapotranspiração de referência.

Antes da poda, a razão SF/LA apresentou uma relação linear com a ET_o e R_g, como observada nas Figura 10A e Figura 10B. Porém, após a poda essa relação perdeu linearidade por um período e começou mostrar uma tendência de retornar à linearidade com a reconstrução da copa. A relação entre SF/LA e déficit de pressão de vapor (VPD) (Figura 10C), não apresentou boa correlação antes da poda ($R^2=0,0347$), após a poda houve uma melhoria na correlação entre as variáveis, apresentado um comportamento similar as outras duas relações para esse mesmo período.

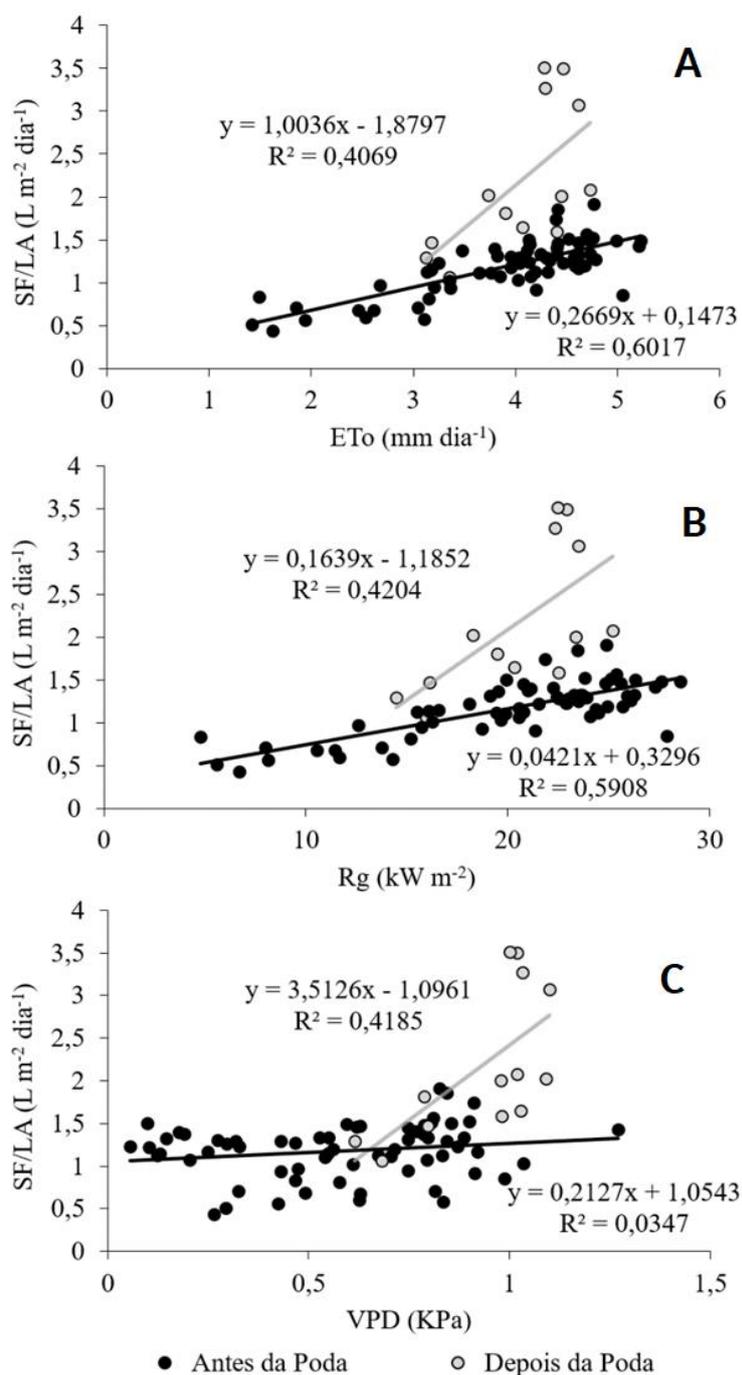


Figura 10. Relação entre a evapotranspiração de referência (ETo), radiação solar global (Rg), déficit de pressão de vapor (VPD) e a razão entre Fluxo de Seiva e Área foliar (SF/LA), para plantas de guaraná em campo antes e após a poda.

4. DISCUSSÃO

O fenômeno do atraso do SF em relação a Rg (Figura 7) foi observado por diversos autores (MARINHO et al. 2013; SANTOS et al., 2020) e representa

a reposição da água dos tecidos da planta perdida ao longo do dia (COELHO FILHO et al., 2011). A permanência de diferenças de potenciais hídricos entre o solo e a folha mantém o movimento de água e pode ser detectado pelas sondas (DAWSON et al., 2007).

Os resultados das medições simultâneas levam a crer que existe uma defasagem temporal entre a transpiração e o fluxo de seiva. Não foi possível identificar o período exato, já que não se mantém constante todos os dias. É comum encontrar na literatura estudos que indicam defasagens entre esses fenômenos que variam de menos de 20 min (KUME et al., 2008) a períodos de horas (ALARCÓN et al., 2000), devido ao tamanho da planta, tipo da planta, condições hídricas e necessidade de armazenamento e reidratação.

As diferenças volumétricas numa escala diária entre a transpiração e fluxo de seiva, podem ser parcialmente responsáveis pelos desvios observados entre essas variáveis na Figura 8 (9,5%) e na literatura: 9,8% para Laranjeira 'Valência' jovem (COELHO et al., 2012), 6,1% para Pimenta Tabasco (MARINHO et al., 2013), 3,3% para Atemoia (SANTOS et al., 2020). Tais variações diárias, normalmente são atribuídas a erros experimentais e não ao armazenamento e recarga hídrica da planta, como bem discutido por Alarcón et al. (2000). Modelos não estacionários que levem em consideração o estado hídrico do solo ou planta talvez apresentem uma melhor estimativa do processo.

ZHUANG et al (2014) avaliaram a absorção de água em plantas de milho com base em um modelo com analogia a uma rede elétrica mais complexa (teoria do circuito RLC em série), que inclui resistores, capacitores, indutores e fusíveis com o intuito de refletir a dinâmica da arquitetura hidráulica da planta em escalas variadas. Os autores observaram que o modelo não estacionário captura a natureza da instantaneidade e histerese da absorção de água pelas plantas devido às considerações de armazenamento de água no xilema das plantas e raízes grossas (efeito de capacitância), arquitetura hidráulica do sistema foliar (efeito indutância) e contato da raiz com o solo (efeito de fusível). Os autores afirmam que o modelo fornece uma melhor compreensão sobre o papel da configuração da planta e heterogeneidade hidráulica que ajudam as plantas a sobreviver em um ambiente adverso.

Coelho Filho et al. (2004) considera a relação SF/ET_o/LA constante de maneira a estimar o fluxo de seiva através dessa relação. Essa metodologia

funcionaria bem para os estádios fenológicos de florescimento e frutificação (Figura 9C). Porém, no período após a poda, foi observado que a relação deixa de ser uma constante, com um comportamento de crescimento e queda. Para explicar esse padrão, foram observadas as relações separadamente. A razão SF/LA teve uma ascendência após a poda, causada, inicialmente, pelo efeito da redução do auto sombreamento de folhas dentro da copa da planta, e uma descendência da relação algum tempo depois, junto ao aumento do auto sombreamento decorrente do crescimento da copa (COELHO FILHO et al., 2011), levando a crer que a LA pode não ter uma boa relação com FS dependendo do estágio fenológico ou estado da copa.

Já a razão SF/ETo deixou de ser constante, apresentou uma queda, mas teve uma tendência de crescimento linear durante todo o período de estudo pós poda, acompanhando o crescimento da área foliar, porém em uma diferente proporção. Esse comportamento também observado por Santos et al. (2021) para a cultura da atemóia e Almeida (2019) para o maracujazeiro, e pode ser justificado pelo número de folhas jovens lançadas pela planta após a poda, de maneira que, folhas jovens tem maior potencial transpirativo que as velhas, devido ao efeito da senescência (SOBRADO, 1994). Assim, o aumento da relação SF/ETo é natural.

Para as condições desse experimento, para o período pré poda, foi observada uma melhor relação do SF/LA com o Rg ($R^2=0,591$) do que com VPD ($R^2=0.035$). Porém, no período pós poda, a relação com ambas as variáveis se tornou similar, causada provável pela maior exposição das folhas ao ambiente, já que existe uma dependência da transpiração em relação a diferença da concentração de vapor d'água entre os espaços foliares e o ar externo e da resistência à difusão dessa via, cujo controle é regulado pelos estômatos (TAIZ et al., 2017). Os resultados demonstraram os efeitos aerodinâmicos e radiativos na evapotranspiração. Estes dependem das condições meteorológicas e da arquitetura da planta, que varia ao longo do tempo.

5. CONCLUSÃO

A aplicação do método de Granier, com correção das diferenças térmicas naturais e modificação do coeficiente angular da equação, comparado com medidas lisimétricas e relacionadas com as variáveis biométricas da planta e de

demanda hídrica da atmosfera, estimou de forma satisfatória o fluxo de seiva da *Paullinia Cupana*.

Existem defasagens temporais entre o fluxo de seiva e a radiação global e defasagem entre o fluxo de seiva e a transpiração que podem afetar a estimativas do consumo hídrico da planta em escala diária.

As relações entre área foliar, fluxo de seiva, evapotranspiração de referência e déficit de pressão de vapor variaram com o desenvolvimento da planta e estado da copa. Modelos que não consideram essas condições em conjunto podem apresentar erros consideráveis na determinação do consumo de água pelas plantas.

REFERÊNCIAS

- ALARCÓN, J. J.; DOMINGO, R.; GREEN, S. R.; SÁNCHEZ-BLANCO, M. J.; RODRÍGUEZ, P.; TORRECILLAS, A. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. **Plant and Soil**, v. 227, n. 1, p. 77-85, 2000.
- ALMEIDA, G. C. Fluxo de seiva e evapotranspiração do maracujazeiro sob diferentes tipos de propagação. 2019.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711 - 728, 2013.
- AMARAL, A. M.; CABRAL FILHO, F. R.; VELLAME, L. M.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A.; DOS SANTOS, L. N. Uncertainty of weight measuring systems applied to weighing lysimeters. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 145, p. 208-216, 2018.
- BRAUN, P. Sap flow measurements in fruit trees-Advantages and shortfalls of currently used systems. In: **II International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 449**. 1997. p. 267-272.
- BUERKI, S.; FOREST, F.; SALAMIN, N.; ALVAREZ, N. Comparative performance of supertree algorithms in large data sets using the soapberry family (Sapindaceae) as a case study. **Systematic Biology**, v. 60, n. 1, p. 32-44, 2010.

- COELHO FILHO, M. A.; ANGELOCCI, L. R.; ROJAS, J. D.; CAMPECHE, L. F. S. M.; FOLEGATTI, M. V. Relações entre transpiração máxima, área foliar e evapotranspiração de referência em pomar jovem de lima ácida Tahiti (*Citrus latifolia* Tan.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 2, p. 265-274, 2004.
- COELHO FILHO, M. A. C.; BASSOI, L. H.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. C. Relação soloplanta- 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. p.27-90.
- 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, p. 573-581, 2012.
- DAWSON, T. E.; BURGESS, S. S.; TU, K. P.; OLIVEIRA, R. S.; SANTIAGO, L. S.; FISHER, J. B.; AMBROSE, A. R. Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems. **Tree Physiology**, v. 27, n. 4, p. 561-575, 2007.
- DELGADO-ROJAS, J. S.; ANGELOCCI, L. R.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO FILHO, M. A. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 404-413, 2007.
- DODD, I. C.; EGEA, G.; DAVIES, W. J. Accounting for sap flow from different parts of the root system improves the prediction of xylem ABA concentration in plants grown with heterogeneous soil moisture. **Journal of Experimental botany**, v. 59, n. 15, p. 4083-4093, 2008.
- FERNÁNDEZ, J. E.; DURÁN, P. J.; PALOMO, M. J.; DIAZ-ESPEJO, A.; CHAMORRO, V.; GIRÓN, I. F. Calibration of sap flow estimated by the compensation heat pulse method in olive, plum and orange trees: relationships with xylem anatomy. **Tree Physiology**, v. 26, n. 6, p. 719-728, 2006.
- GRANIER, A. 1985. A new method of sap flow measurement in tree stems. **Ann. Sci. For.** 42:193–200.
- IBGE. Série histórica da estimativa anual da área plantada, área colhida, produção e rendimento médio dos produtos das lavouras. **IBGE**, 2020. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>.> Acesso em: 05/11/2020.

- KUME, T.; KOMATSU, H.; KURAJI, K.; SUZUKI, M. Less than 20-min time lags between transpiration and stem sap flow in emergent trees in a Bornean tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 6-7, p. 1181-1189, 2008
- LIU, X.; LI, Y.; CHEN, X.; ZHOU, G.; CHENG, J.; ZHANG, D.; ZHANG, Q. Partitioning evapotranspiration in an intact forested watershed in southern China. **Ecohydrology**, v. 8, n. 6, p. 1037-1047, 2015.
- LU, P.; URBAN, L.; ZHAO, P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. **ACTA BOTANICA SINICA-ENGLISH EDITION**, v. 46, n. 6, p. 631-646, 2010.
- MARINHO, L. B.; VELLAME, L. M.; FRIZZONE, J. A.; JÚNIOR, J. B. T.; FRAGA JUNIOR, E. F. Tabasco pepper transpiration by the heat dissipation probe method. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 1, p. 11-18, 2013.
- MONTEITH, J. L. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. **Plant, Cell & Environment**, v. 18, n. 4, p. 357-364, 1995.
- PAUDEL, I.; NAOR, A.; GAL, Y.; COHEN, S. Simulating nectarine tree transpiration and dynamic water storage from responses of leaf conductance to light and sap flow to stem water potential and vapor pressure deficit. **Tree physiology**, v. 35, n. 4, p. 425-438, 2015.
- SANTOS, I. M. S.; VELLAME, L. M.; ARAÚJO, J. F.; MARINHO, L. B. CALIBRATION OF THE THERMAL DISSIPATION PROBE FOR ATEMOYA:(*Annona squamosa* x *A. cherimola*). **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 545-554, 2020.
- SANTOS, I. M. S.; VELLAME, L. M.; MARINHO, L. B.; ARAÚJO, J. F. Atemoya sap flow estimation as a function of leaf area and reference evapotranspiration. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, 2021.
- SÉRVULO, A. C.; VELLAME, L. M.; CASAROLI, D.; ALVES, J.; SOUZA, P. H. D. African Mahogany transpiration with Granier method and water table lysimeter. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 322-326, 2017.
- SOBRADO, M. A. Leaf age effects on photosynthetic rate, transpiration rate and nitrogen content in a tropical dry forest. **Physiologia Plantarum**, v. 90, n. 1, p. 210-215, 1994.

- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.
- TFOUNI, S. A. V.; CAMARGO, M. C. R.; VITORINO, S. H. P.; MENEGÁRIO, T. F.; TOLEDO, M. C. D. F. Contribuição do guaraná em pó (*Paullinia cupana*) como fonte de cafeína na dieta. **Revista de Nutrição**, 2007.
- VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 516-523, 2009.
- VELLAME, Lucas Melo. **Relações hídricas e frutificação de plantas cítricas jovens com redução de área molhada do solo**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- VELLAME, L. M.; COELHO, R.D.; TOLENTINO, J. B.; Transpiração de plantas jovens de laranja “valência” sob porta-enxerto limão “cravo” e citrumelo “swingle” em dois tipos de solo. *Rev. Bras. Fruticultura*, Jaboticabal -SP, v. 34, n. 1, p. 024-032. 2012.
- ZHUANG, J.; YU, G.R.; NAKAYAMA, K. A series RCL circuit theory for analyzing non-steady-state water uptake of maize plants. *Scientific reports*, v. 4, p. 6720, 2014.

CAPÍTULO II - FLUXO DE SEIVA DO GUARANAZEIRO (*Paullinia Cupana*) SOB RESTRIÇÃO DE VOLUME DE SOLO MOLHADO

RESUMO

O guaraná é um fruto de origem amazônica e é majoritariamente produzido em sequeiro, já que a cultura é comumente plantada em locais de alta precipitação. O seu cultivo está se expandindo para demais Estados do país, sendo atualmente o Estado da Bahia o maior produtor de guaraná. Este trabalho objetivou observar o impacto da redução do volume molhado de solo no fluxo de seiva em plantas jovens de guaranazeiro e a aclimatação do mesmo. Para isso foram utilizados 48 vasos de 500 L, em que metade desses receberam uma divisória que limita a irrigação a 25% do volume de solo. As plantas de guaraná foram submetidas a 4 (quatro) tratamentos cujo volume de solo molhado variou com o tempo, simulando quatro condições de irrigação. Foi utilizado o método de Granier previamente calibrado para a cultura para a estimativa do fluxo de seiva. Foi observado o fluxo de seiva relativo ao controle ao longo do tempo e em relação ao ETo do período, a variação da densidade de raízes e a diferença de temperatura foliar entre os tratamentos. A cultura se aclimatou a redução do volume molhado, porém, o processo foi lento e a redução causou um grande impacto inicial, quase tão prejudicial quanto a privação total da irrigação. O comportamento da diferença da temperatura foliar entre os tratamentos e o controle se assemelhou ao do fluxo de seiva, de maneira que a diferença de temperatura aumentou à medida que o fluxo de seiva reduziu.

Palavras-Chave: temperatura foliar, dissipação de calor, método de Granier, déficit hídrico.

ABSTRACT

Guarana is a fruit of Amazonian origin and is mostly produced without irrigation, as the crop is commonly planted in places with high rainfall. Its cultivation is expanding to other states in the country, with the state of Bahia currently being the largest producer of guarana. This work aimed to observe the impact of the reduction of soil wetted volume on the sap flow in young guarana plants and their acclimatization. For this, 48 pots of 500 L were used, half of which received a divider that limits irrigation to 25% of the soil volume. The guarana

plants were submitted to 4 (four) treatments whose wet soil volume varied with time, simulating four irrigation conditions. The Granier method previously calibrated for the crop was used to estimate the sap flow. The sap flow relative to the control over time and in relation to the ETo of the period, the variation in root density and the difference in leaf temperature between treatments were observed. The crop acclimatized to the reduction of wetted volume, however, the process was slow and the reduction caused a great initial impact, almost as harmful as the total deprivation of irrigation. The behavior of the leaf temperature difference between the treatments and the control was similar to that of the sap flow, in a way that the temperature difference increased as the sap flow decreased.

KEYWORDS: *leaf temperature, heat dissipation, Granier method, water deficit.*

1. INTRODUÇÃO

O guaranazeiro (*Paullinia cupana*) pertencente à família das Sapindáceas e é nativa da Amazônia (ATROCH & NASCIMENTO FILHO, 2018). A planta é um arbusto trepador, que foi domesticada devido as suas sementes serem ricas em cafeína, chegando a apresentar 6% da substância na sua composição, muito utilizadas por indústrias de refrigerantes e bebidas energéticas (SCHIMPL et al., 2013) e tem o Brasil como o único produtor comercial, abastecendo a indústria nacional e mundial (ATROCH & NASCIMENTO FILHO, 2018). O cultivo do guaranazeiro está se expandindo para demais Estados do país, sendo atualmente o Estado da Bahia o maior produtor de guaraná (IBGE, 2020).

O guaraná é majoritariamente produzido em sequeiro, já que a cultura é comumente plantada em locais de alta precipitação, sendo indicados locais com precipitação entre 1500 mm e 3000 mm, com um período de seca definido, para que haja indução do florescimento (COSTA & SOUZA, 1999; PEREIRA, 2005). Porém, no caso da produção comercial de frutas em geral, a irrigação é utilizada para garantir a qualidade e produtividade dos pomares, bem como para atingir a produção fora de época, sendo esse um provável caminho viável para produção do guaraná em outras localidades (VASCONCELOS et al., 2012; LIMA et al., 2014).

A irrigação localizada é a mais utilizada na irrigação de fruteiras e culturas de grandes espaçamentos, por proporcionarem uso mais eficiente da água, devido a possibilidade de molhar apenas a área correspondente a raiz da planta. A adoção deste sistema de irrigação diminui a ação da evaporação em solo exposto e dependendo das características dos emissores, podem-se obter diferentes porcentagens de área molhada (SOUZA et al., 2003).

O uso de pequenas áreas molhadas vem trazendo bons resultados em economia de água e suprimindo relativamente bem as necessidades da planta. Souza et al. (2003) estudaram a influência da porcentagem de área molhada na produção de lima ácida 'Tahiti'. Utilizaram redução de área molhada de até 15% e não foram observadas variações significativas na produção e qualidade do fruto. Vellame et al. (2015) avaliaram os efeitos do molhamento parcial do solo sobre a transpiração e crescimento vegetativo de laranjeiras jovens com volume molhado de solo até 12,5%. Detectaram a diminuição no fluxo de seiva, sendo estabilizado após 156 dias de tratamento, porém não houve variação no crescimento vegetativo comparado com irrigação em todo o reservatório.

A redução da área molhada induz mecanismos de aclimação para a planta, sendo os mais diretos na raiz, de maneira que a arquitetura da mesma se modifica, aumentando sua densidade na região mais úmida do solo, melhorando a absorção de água. Esses mecanismos são facilmente visíveis na utilização da técnica da irrigação com secamento parcial do sistema radicular (PRD), como observado por Sharma et. al (2015).

A redução da área molhada também pode levar a deficiência hídrica, que por sua vez provoca alterações no comportamento vegetal, cuja irreversibilidade vai depender do genótipo, do estágio de desenvolvimento da planta e da duração e severidade do estresse (SILVA et al. 2012).

A transpiração é o principal componente da evapotranspiração, principalmente quando se utiliza irrigação localizada, onde a irrigação é realizada em apenas uma parte do solo (VELLAME et al., 2009). O fluxo de seiva é comumente utilizado para estimativa da transpiração (WULLSCHLEGER et al., 2001). Existem diversos métodos térmicos para medição do fluxo de seiva, porém, devido a sua simplicidade e baixo custo, o método de Granier (1985), se tornou o mais popular (HÖLTTÄ et al., 2015).

O objetivo desse trabalho foi observar o impacto da redução do volume molhado de solo no fluxo de seiva do guaranazeiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação com cobertura plástica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Município de Cruz das Almas, BA (12° 48' S; 39° 06' O; 225 m de altitude). Segundo a classificação de Köppen, avaliado por Alvares et al. (2013), o clima é tipo tropical quente e úmido (Af), sem estação seca definida. A precipitação média é de 1.224 mm por ano, com média anual da umidade relativa do ar acima de 82% e temperatura média de 24,5° C.

Foram utilizados 48 reservatórios de 0,5 m³ (Figura 11) preenchidos com material da camada de 0-0,20 m de Latossolo Amarelo Distrocoeso e peneirado com malha de 0,005 m, cuja análise granulométrica está descrita na Tabela 3. A camada superior do reservatório, de 0,15 m de espessura, recebeu uma mistura com proporção de 1/6 de esterco bovino (v/v), como matéria orgânica. O sistema de drenagem constitui-se de uma camada de brita com 0,08 m de espessura, 0,01 m de areia lavada e uma tela de nylon separando essas duas camadas, sendo a água drenada por um orifício 0,025 m na parte inferior do reservatório.



Figura 11. Reservatórios com plantas jovens de guaraná.

Tabela 3. Análise granulométrica do solo expressa em g kg⁻¹.

AMG	AG	AM	AF	AMF	AT	Silte	Argila
43	215	272	186	51	767	27	206

*AMG – Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM – Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; AT – Areia total.

Metade dos reservatórios receberam divisórias que têm a função de limitar o volume molhado pela irrigação para 25% do volume total. As divisórias foram confeccionadas com chapas de madeira de 0,003 mm coberta com lona, deixando o centro do reservatório livre para que as raízes se distribuam livremente entre os compartimentos, como mostrado na Figura 12.

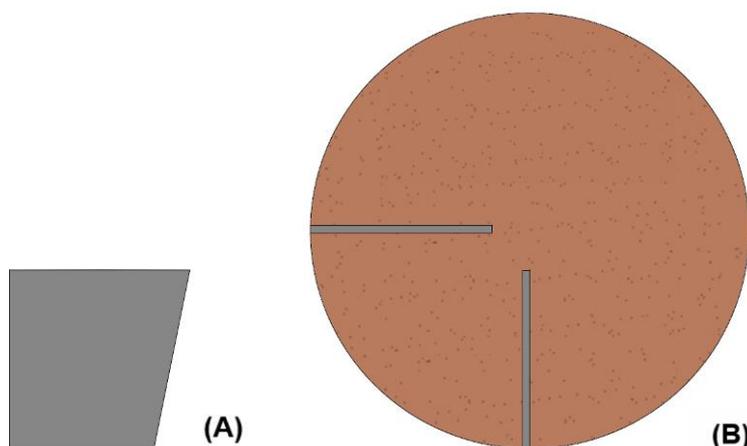


Figura 12. Formato da chapa de madeira usada na divisão do volume no reservatório (A) e instalação de divisórias nos reservatórios (B).

As mudas do guaranzeiro foram oriundas de sementes de plantas selecionadas quanto a resistência a fitopatologias, tamanho das sementes e cacho (racemo) com frutos fecundados e facilidade de colheita manual pela retirada do cacho da planta quando atinge o ponto de colheita. As sementes foram lavadas para a retirada da massa branca e germinadas em areia lavada. Após a germinação, as plântulas foram selecionadas e transplantadas para recipientes de polietileno de 0,15 x 0,25 m preenchidos com uma mistura de Latossolo Amarelo e compostagem na proporção 2:1 com base em volume (v/v). Após 9 meses as mudas de guaraná com 6 folhas definitivas foram transplantadas para os reservatórios.

A irrigação do experimento foi realizada por um sistema de gotejamento, composto por um gotejador tipo botão de 4 L h⁻¹, ligado a 4 dispersores por reservatório. O manejo da irrigação foi realizado diariamente e o volume de água a ser irrigado era calculado de maneira que o solo retornasse a capacidade de campo (10kPa), sendo a umidade atual era calculada pela curva de retenção de água, cujo os parâmetros estão descritos na Tabela 4, com a tensão obtida através de 12 tensiômetros instalado a 20 cm da planta e 20 cm de profundidade, sendo que os tanques com divisórias receberam dois tensiômetros, um na parte limitada e outro na parte maior.

Tabela 4. Parâmetros da equação de Van Genuchten.

Θ_s	Θ_r	α	n	λ	K_s	R^2	RMSE
$m^3 m^{-3}$	$m^3 m^{-3}$	m^{-1}			$m h^{-1}$		
0,472	0,022	5,5	1,52	0,008	3×10^{-3}	0,93	0,006

O experimento foi dividido em quatro fases quanto à irrigação, com 12 repetições para cada tratamento, distribuídos de forma inteiramente casualizada na casa de vegetação. Cada tratamento simula um cenário de cultivo, onde o primeiro tratamento simula uma região que chove muito durante o ano e com boa distribuição, de maneira que a cultura tem água disponível em todo volume de solo durante todo o ano. O segundo cenário simula um local com pouca chuva e que grande parte da água ofertada a cultura provem de irrigação localizada. O terceiro e quarto tratamento simulam regiões que chovem com boa frequência e volume durante o ano, porém, apresenta períodos de estiagem de média duração, como a própria cidade de Cruz das Almas-BA onde foi realizado o experimento.

Para isso o experimento foi dividido em 4 fase. Na fase inicial do experimento todos os reservatórios foram irrigados em 100% do volume do solo até que as plantas atingissem o porte necessário para instalação das sondas de fluxo de seiva e possibilitasse o início da coleta de dados, correspondente a um período de aproximadamente um ano após o transplântio. Essa primeira etapa foi importante para que as mudas se aclimassem ao novo local, para que as raízes das plantas se desenvolvessem uniformemente e para conhecer o potencial transpirativo de cada planta.

Nas demais fases, o experimento sofreu variações em relação a irrigação, o tratamento testemunha continuou irrigado em 100% do volume de solo durante todo o experimento; o segundo tratamento foi irrigado 25% do volume de solo durante o resto do experimento e os outros dois tratamentos foram irrigados em 100% do volume de solo na segunda fase. A segunda fase teve duração de aproximadamente seis meses para que as plantas do tratamento dois tivessem tempo suficiente para se aclimatar.

Na terceira fase, apenas os tratamentos 3 e 4 sofreram variação na irrigação, essa durou 21 dias, já que foi a duração média de períodos de estiagem na cidade em uma série histórica de 30 anos. O tratamento três ficou esse período sem receber nenhuma reposição hídrica e o quarto passou a receber irrigação em apenas 25% da área. Depois desse período deu-se início a fase quatro e as plantas voltam a ser irrigadas como eram na fase dois, essa fase visou observar o comportamento das plantas ao retorno da irrigação em todo o volume de solo. Na Tabela 5 foram descritas as definições acima dos tratamentos estudados.

Tabela 5. Manejo de irrigação para as três fases, considerando a percentagem do volume de solo irrigado.

<i>Tratamento</i>	<i>Fase 1 (1 ano)</i>	<i>Fase 2 (6 meses)</i>	<i>Fase 3 (21 dias)</i>	<i>Fase 4 (10 dias)</i>
1 (100/100)	100%	100%	100%	100%
2 (25/25)	100%	25%	25%	25%
3 (100/0)	100%	100%	0%	100%
4 (100/25)	100%	100%	25%	100%

Os sensores de fluxo de seiva foram compostos por uma sonda de aquecimento e por uma sonda de referência (Figura 13). As sondas foram construídas no Laboratório de Instrumentação Agrícola, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRB, foram utilizadas agulhas de 0,001 m de diâmetro e 0,01 m de comprimento. As sondas aquecedoras tiveram a agulha envolvida por um fio de constantan, que foi utilizada como resistência para gerar calor e ambas as sondas tiveram em seu interior um termopar feito pela união de fios de cobre e constantan, ambos com 0,0005 m de diâmetro.

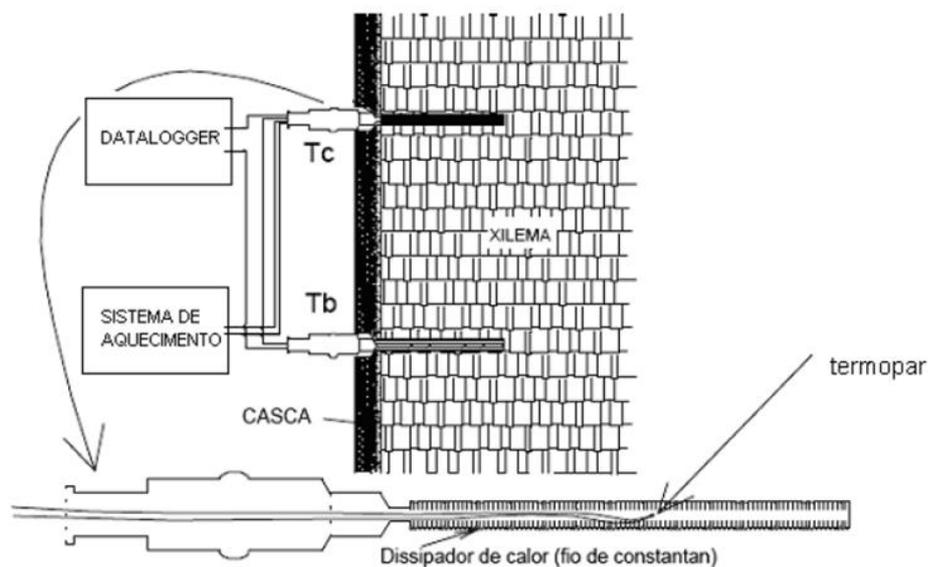


Figura 13. Esquema dos sensores do fluxo de seiva para o método da dissipação de calor.

Para instalar as sondas foram feitos 2 furos em direção radial, alinhados verticalmente e distanciados em 0,08 m, com o comprimento igual ao das sondas e um diâmetro ligeiramente maior. Para melhorar a condução de calor, as sondas foram revestidas com pasta térmica antes de serem inseridas. Por fim, foi efetuado um revestimento com papel alumínio em forma de saia, para reduzir o efeito térmico do exterior no seguimento do caule.

Para a coleta de dados utilizou-se um datalogger CR800 da Campbell SCi em associação com dois multiplexadores AM 16/32B também da Campbell SCi. Para o sistema de aquecimento foram utilizadas placas controladoras de tensão desenvolvidas com a plataforma Arduino, as quais mantêm a potência aplicada nas sondas de aquecimento em $0,1 \text{ W.cm}^{-1}$, durante 24 horas por dia.

Para minimizar os efeitos das diferenças térmicas naturais (DTN) sobre as sondas, foi instalado mais um sensor de fluxo de seiva em uma planta na proximidade, na qual não foi medido o fluxo. Esta teve o aquecimento desligado durante todo o experimento e serviu de conjunto de referência. O aquecimento das demais sondas foi desligado por um período de 48 horas. Assim, foram medidas as diferenças térmicas entre as duas sondas sem aquecimento e, a partir disso foi gerado um modelo de estimativa por meio de regressão em função da variação do conjunto de referência (DTNe). Posteriormente, os dados obtidos

foram corrigidos com base nesses modelos, através da seguinte equação (Equação 6).

$$\Delta T = \Delta Tm - DTNe \quad (6)$$

Em que:

ΔT - diferença de temperatura entre sondas atual corrigida, °C;

ΔTm - diferença de temperatura entre sondas não corrigida, medida pela sonda, °C;

$DTNe$ - diferença térmica natural estimada para cada sonda, °C.

Foi utilizada a equação de Granier (1985) calibrada para a cultura, Equação 7, para estimativa do fluxo de seiva (SF).

$$SF = 0,000266 \left(\frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1,231} A_s \quad (7)$$

Em que:

ΔT_{max} - Diferença de temperatura a fluxo zero, quando somente ocorre perda de calor por condução, °C;

ΔT - Diferença de temperatura entre as duas sondas, °C;

A_s - Área da seção condutora, m².

A determinação da área condutora na seção do caule foi realizada através do corte de vários ramos de diferentes espessuras e com o auxílio do software computacional AutoCAD foi delimitado a área condutora e calculado seu valor em cm². Por fim, através de regressão foi obtida uma equação que relaciona o diâmetro externo do caule com sua área condutora (Equação 8).

$$CA = 0,8847 d^2 - 0,9101 d + 0,5717 \quad (8)$$

Em que:

CA - Área condutora de seiva, cm²;

d - Diâmetro do caule, cm.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada através de dados de uma estação meteorológica instalada no interior da casa de vegetação, que obtém dados de temperatura, umidade do ar e radiação.

Foi utilizada a equação de Penman-Montheith para o cálculo da ET_o, onde foi considerado um valor fixo de velocidade do vento igual 0,5 m s⁻¹, como recomendado pelo Boletim FAO 56 (Allen et al., 1998) para interiores de casa de vegetação.

Foram realizadas avaliações biométricas no início e fim de cada fase do experimento e no meio da fase 3, onde foi medido o diâmetro no caule, através da média de 3 medidas realizadas em uma altura média entre as duas sondas do fluxo de seiva, com o auxílio de um paquímetro. Também foi obtida a área foliar realizando-se a contagem do número de folíolos e medindo o comprimento e largura de 20% desses. Com o auxílio da Equação 9 foi calculada a área foliar média dos folíolos da planta, cujo coeficiente foi ajustado através de regressão de dados de altura e largura medidos com régua e de área foliar através do escaneamento dos folíolos. Essa área média foi multiplicada pelo número total de folíolos para obter a área foliar total da planta.

$$LA = 0,6931 W L \quad (9)$$

Em que:

LA - Área foliar (m²)

L - Comprimento da folha (m);

W - Largura da folha (m);

Foi calculado o percentual do fluxo de seiva relativo para 100% de área molhada (SF_r), a partir da relação entre transpiração de cada planta e a transpiração média das plantas com 100% de área molhada (controle) (Equações 10 e 11).

$$SF_{es} = \frac{SF_{f1}}{SF_{100\%_f1}} * SF_{100\%_f3} \quad (10)$$

$$SF_r = \frac{SF_{f3}}{SF_{r_{aj}}} * 100 \quad (11)$$

Em que:

SF_{es} – fluxo de seiva esperado para uma condição de 100% de área molhada, L dia⁻¹;

SF_r – fluxo de seiva relativo para 100% de área molhada, L dia⁻¹;

SF_{f1} - fluxo de seiva médio da planta quando inicialmente estava com 100% de área molhada na fase 1, L dia⁻¹;

$SF_{100\%_f1}$ - fluxo de seiva médio das plantas do tratamento controle na fase 1, L dia⁻¹;

$SF_{100\%_f3}$ - fluxo de seiva médio das plantas do tratamento controle na fase 3, L dia⁻¹; e

SF_{f3} - fluxo de seiva da planta com variação de volume molhado na fase 3, L dia⁻¹.

Para análise de raízes, foram realizadas amostragem em todos os compartimentos dos reservatórios e em dois momentos, no dia anterior ao início da fase 3 e no dia posterior ao fim da fase 3. As amostragens de raízes foram realizadas com um tubo de PVC de 0,043 m de diâmetro interno, que foi inserido no solo até a profundidade de 0,3 m. A separação das raízes do solo foi realizada através da imersão da amostra em água, em seguida as raízes foram digitalizadas e tiveram seu volume total calculado através do *software* Safira® 2010.

Durante a terceira fase foi realizada a mediação da temperatura foliar como indicador de estresse hídrico, essa obtida com o auxílio de um termômetro infravermelho. Foram realizadas medições três dias por semana, sendo realizadas cinco medições no dia, às 8, 10, 12, 14 e 16 horas, em três plantas de cada tratamento. A temperatura foliar foi comparada com a temperatura do ambiente para identificação do estresse hídrico.

Como não havia repetições para o SFr, foi aplicado um teste de média em que o SFr de 3 dias seguidos foi considerado como repetições dentro desse período.

As comparações de médias foram realizadas utilizando-se do teste de Tukey, no nível de 5% de probabilidade, com auxílio do programa estatístico SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 14 pode ser observado o curso do SFr dos quatro tratamentos e a ETo entre 09/08/2021 e 16/09/2021, englobando os últimos 10 dias da fase 2, a fase 3 do experimento e mais 10 dias da fase 4. Como se baseia nas médias do tratamento controle, esse se mantém em 100% durante todo o período. O tratamento 25/25 foi o tratamento que mostrou menos variação no período e o tratamento 100/0 demonstrou uma pequena queda durante todo o período. Além disso, foi observada uma relação inversa entre o ETo e o SFr para os três tratamentos, de maneira que menores valores de ETo retornaram maiores valores de SFr.

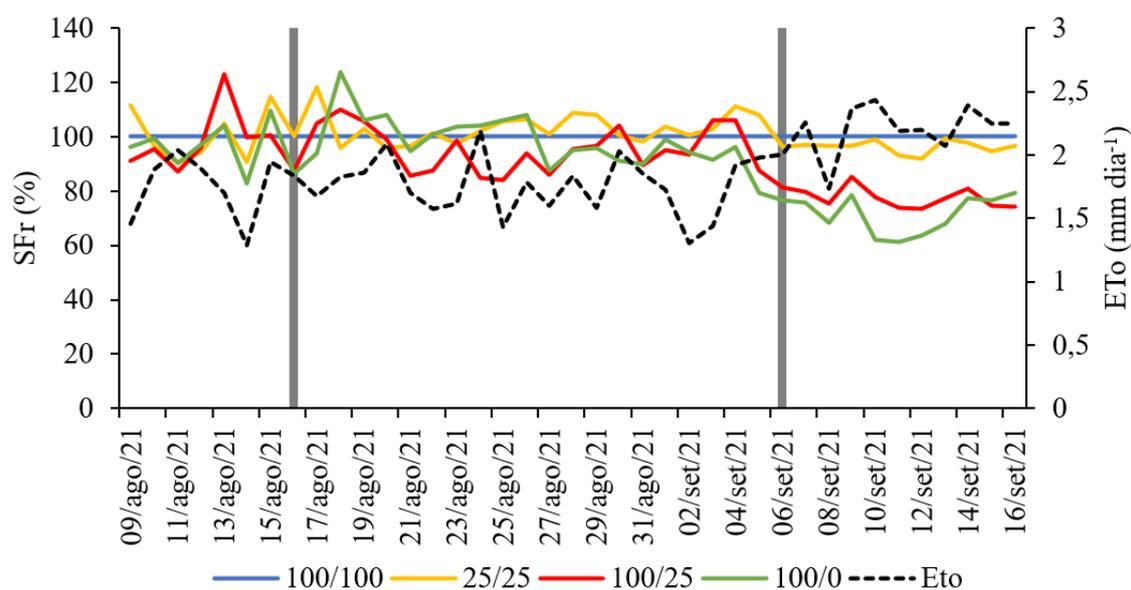


Figura 14. Percentual do fluxo de seiva relativo e Evapotranspiração de referência durante a fase 3, em que, barras em cinza representam início e fim da fase 3.

A partir do dia 04 de setembro, dois dias antes do retorno da irrigação, houve um aumento da ETo e esse evento causou um impacto no SFr dos três tratamentos, de maneira que é visível que os três sofreram algum tipo de déficit em intensidades diferentes, marcado pelo distanciamento da curva do tratamento controle, mesmo com o retorno da irrigação ao 100% do volume, sendo o tratamento 100/0 o que sofreu maior redução do SFr

É possível identificar na Tabela 6 que os tratamentos 100/100 e 25/25 não se diferenciaram nesse período, porém, o tratamento 100/25 começou a se diferenciar dos tratamentos que não tiveram variação na irrigação a partir do intervalo 8 (06/09 a 08/09) e o tratamento 100/0 a partir do intervalo 7 (03/09 a 05/09).

Tabela 6. SFr para os quatro tratamentos divididos em intervalos de 3 dias.

Int	Período	SFr (%)							
		100/100		25/25		100/25		100/0	
1	16/08 a 18/08	100	A a	104,73	A a	100,75	A a	101,46	A a
2	19/08 a 21/08	100	A a	98,4	A a	96,83	A a	102,90	A a
3	22/08 a 24/08	100	A a	100,29	A a	90,34	A ab	102,88	A a
4	25/08 a 27/08	100	AB a	104,26	A a	87,97	B ab	100,51	AB a
5	28/08 a 30/08	100	A a	105,75	A a	98,66	A a	93,96	A a
6	31/08 a 02/09	100	A a	100,9	A a	92,73	A ab	94,43	A a
7	03/09 a 05/09	100	AB a	107,32	A a	99,98	AB a	88,96	B ab
8	06/09 a 08/09	100	A a	96,61	A a	78,89	B b	73,63	B bc
9	09/09 a 11/09	100	A a	96,28	A a	78,96	B b	67,43	B c
10	12/09 a 14/09	100	A a	96,37	A a	77,21	B b	69,67	B c

Letras minúsculas iguais na mesma coluna não diferenciam entre si e letras maiúsculas iguais na mesma linha não diferenciam entre si pelo teste Tukey $p < 0,05$ de significância.

Esperava-se que o tratamento 100/25 voltasse a ter um SFr próximo ao 100%, já que o tratamento 25/25 manteve esse comportamento, porém, a duração do tratamento não foi suficiente para observar esse resultado. Vellame et al. (2015) encontraram um intervalo de 156 dias para a aclimação de laranjeiras com 12,5% de área molhada.

A queda do fluxo de seiva pode ser explicada fisiologicamente pela produção do ácido abscísico do xilema (ABA). Como explicado por Liu et al. (2005), o ABA é produzido nas raízes secas e é transportado pelo fluxo de seiva no xilema até as folhas, onde pode ser acumulado em altos níveis, induzindo ao fechamento estomático e inibição da expansão foliar, podendo diminuir significativamente a taxa de transpiração, o que impede a desidratação dos tecidos foliares e aumenta a chance de sobrevivência sob estresse hídrico prolongado.

Tal fenômeno também pode explicar o atraso do retorno do potencial transpirativo da planta após o retorno da irrigação, já que as folhas podiam estar com um alto nível de ABA. Agehara & Leskovar (2012) estudaram o efeito de altas concentrações de ABA no melão, e seus resultados sugerem que níveis excessivos de ABA retardam o crescimento pós-estresse, apesar do efeito positivo na manutenção do estado hídrico e integridade da membrana.

Ao relacionar o SFr com a ETo, Figura 15, foi observado uma relação inversa para os três tratamentos com variação do volume molhado, ou seja, houve redução do SFr com o aumento da ETo, o que pode significar redução no potencial transpirativo e algum tipo de déficit hídrico (ESPADAFOR et al., 2017), de maneira que o tratamento menos afetado, coeficiente linear menos negativo, foi o 25/25 e o 100/0 o mais afetado, coeficiente linear mais negativo.

O tratamento 100/25, nesse curto intervalo, teve um comportamento similar e um pouco mais brando que o tratamento 100/0, indicando que para o guaranazeiro a redução parcial do volume molhado em um curto período de tempo é quase tão prejudicial quanto cessar a irrigação completamente.

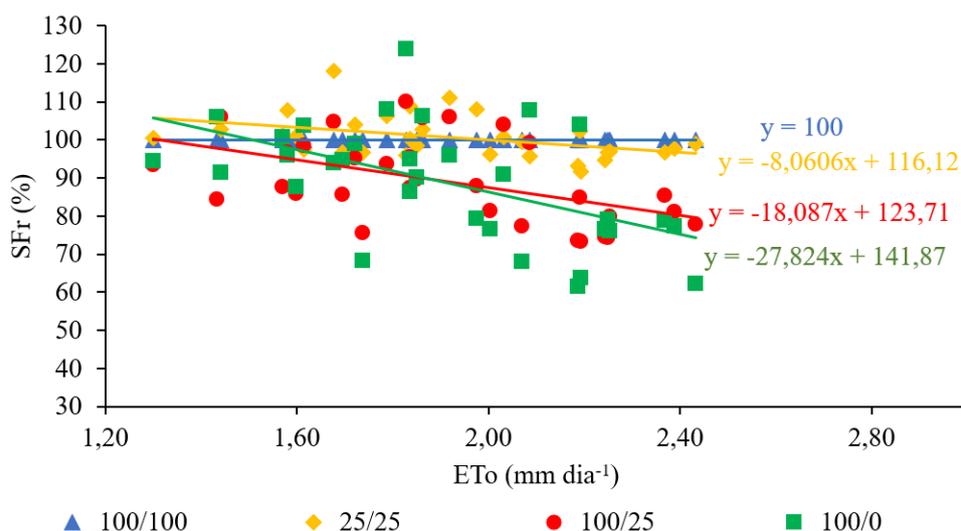


Figura 15. Relação entre ET₀ e SFr no período de estudo.

Levando-se em conta que a relação entre a SFr e ET₀ desconsidera a variação da ET₀ no tempo, relacionou-se o SFr e a ET₀ acumulada no tempo, (Figura 16). Foi possível observar que o tratamento 25/25 não sofreu variações no período, enquanto os tratamentos 100/25 e 100/0 apresentaram quedas no SFr em um momento similar ao apresentado na Tabela 6.

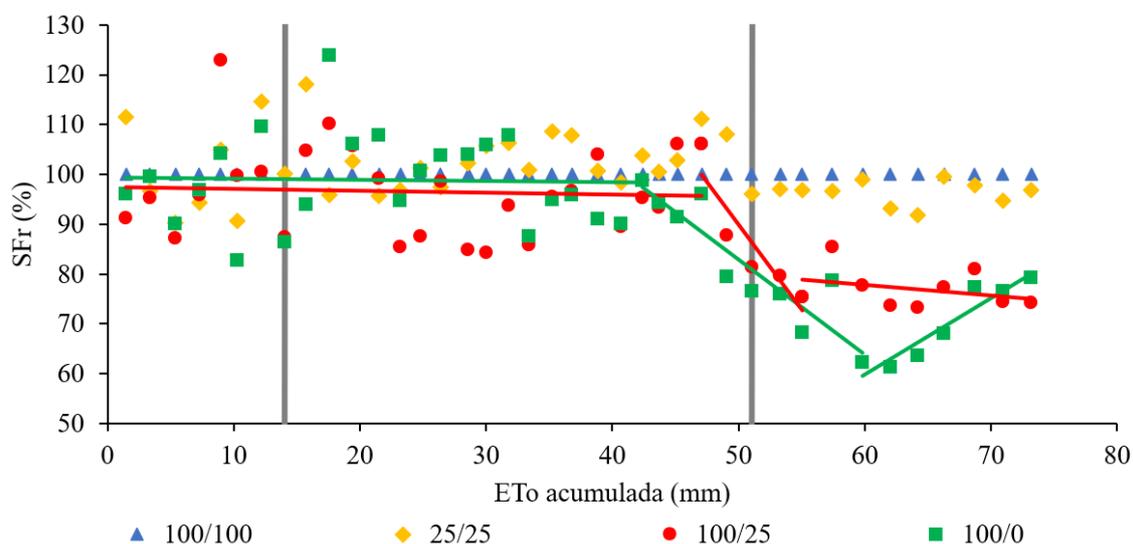


Figura 16. Relação do SFr com a ET₀ acumulada no período de estudo.

Foram encontrados na literatura muitos outros trabalhos que relacionam a área molhada ao desempenho de algumas culturas. Espadafor et al. (2018) observaram que ao aumentar a área molhada de amendoeirais, de 18% para 35%, através da troca do sistema de irrigação por gotejamento para micro

aspersão e mantendo a umidade do solo, houve um aumento da transpiração, melhoria no estado hídrico e crescimento da copa, quando comparado as plantas que mantiveram a área molhada reduzida, concluindo que a transpiração de amendoeiras pode ser limitada por um volume insuficiente de solo molhado, mesmo quando abastecido com uma lâmina de água adequada, devido à alta resistência hidráulica em épocas de alta demanda evaporativa.

Coelho et al. (2016) observaram que uma maior área molhada da superfície do solo promove maior expansão do sistema radicular, maior área foliar, maior comprimento de frutos e maior produtividade em bananeira 'Grand Naine', em que o aumento da área molhada de 10,17 m² para 24,18 m², provocou um acréscimo na produção de 39,55 para 53,27 t ha⁻¹.

Ambos os trabalhos demonstram que as culturas estudadas conseguem se desenvolver aparentemente bem com a redução da área molhada, assim como o tratamento 25/25; por outro lado, essa redução causa limitações no desenvolvimento e rendimento das plantas, demonstrando a necessidade de estudo sobre área e volumes molhados mínimos para as diversas culturas.

A Tabela 7 apresenta a densidade de raiz para os quatro tratamentos antes do início da fase 3 e após a mesma. Devido aos grandes coeficientes de variação dessa variável, não foi encontrado variações estatisticamente significantes, porém a variação média da densidade de raiz do compartimento que se manteve molhado do tratamento 100/25 variou bem mais que os outros, mostrando que a planta lançou mais raízes no compartimento irrigado para compensar a falta de água do compartimento não irrigado.

Porém, se observar o tratamento 25/25 que está há seis meses com limitação de volume molhado, é possível observar que existe uma densidade de raiz de 2,25 vezes maior no compartimento que se manteve irrigado em comparação ao que não recebeu irrigação nesse período. Mais um indício de adaptação da planta, mas que é muito maior que a duração do estudo da fase 3.

Tabela 7. Densidade de raiz (vol. Raiz/ vol. Solo) dentro de cada compartimento para todos os tratamentos antes e depois da fase 3.

Densidade (cm³/cm³)			
	Antes da	Depois da	
Tratamento	F3	F3	Variação
100/100	0,0112	0,0104	-7,14%
25/25 E	0,0063	0,0067	5,8%
25/25 I	0,0142	0,0161	13,4%
100/25 E	0,0183	0,0172	-6,2%
100/25 I	0,0136	0,0177	30,7%
100/0	0,0088	0,0095	8,4%

*I-compartimento irrigado e E-compartimento não irrigado.

Apesar dos sinais de aclimação do guaranazeiro, os resultados contrastam com os encontrados por Vellame et al. (2015) estudando citros, em que reduzindo o volume molhado para 12,5%, as plantas demoraram apenas 7 dias para retomar sua atividade de absorção num nível similar ao período anterior à limitação de volume molhado, mesmo que não seja possível determinar se foi através do lançamento de novas raízes ou pelas raízes antigas. Tal diferença pode ser explicada pelas melhorias genéticas realizadas em citros contra déficits, tornando seu sistema radicular mais agressivo e eficiente, diferente do guaraná que vem de uma região com abundância de água e que nunca sofreram nenhum tipo de melhoramento genético.

Em relação ao crescimento vegetativo, não foram encontradas variações significativas para as variáveis estudadas.

Pereira (2005) afirma que o guaraná necessita de um período de seca para o florescimento. Entretanto não ocorreu florescimento induzido pelos tratamentos de redução de volume molhado ou o cessamento da irrigação. Ocorreu florescimento das plantas no verão anterior ao experimento em condição de irrigação plena. Assim, outros fatores ambientais como temperatura do ar podem estar relacionados a indução do florescimento.

A Figura 17 compara a temperatura foliar do tratamento irrigado plenamente durante o período (100/100) com os demais tratamentos. Enquanto o tratamento 25/25 manteve sua temperatura similar ao tratamento controle, o

tratamento 100/25 e 100/0 apresentaram um aumento de temperatura ao final da fase 3. A redução do fluxo e seiva e conseqüentemente da transpiração foliar, causada pelo estresse da redução do volume molhado, resulta na regulação ativa da abertura estomática, aumentando a temperatura foliar devido a limitação do resfriamento evaporativo (INOUE et al., 1990).

Comparando com a Tabela 6, observa-se um comportamento similar no tempo entre a redução do SFr e o aumento da temperatura foliar, de maneira que a queda do SFr no tratamento 100/0 só se mostrou significativo a partir do dia 03/09. Porém é possível identificar uma queda mais acentuada a partir do dia 28/08, assim como acontece com a temperatura foliar. Algo similar acontece com o tratamento 100/25 onde o SFr só foi significativo a partir do dia 06/09, período similar ao aumento visível de temperatura.

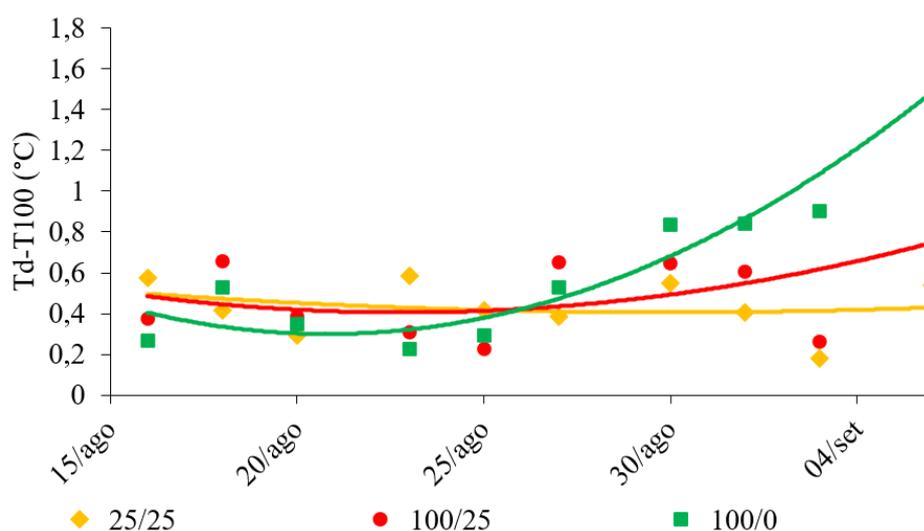


Figura 17. Diferença entre a temperatura foliar dos três tratamentos em relação ao controle ao longo da fase 3.

4. CONCLUSÃO

Foi verificado que o guaranazeiro conseguiu se adaptar a uma redução de 75% do volume molhado (0,1 m³), baseado no tratamento 25/25, mantendo seu potencial de fluxo de seiva.

A redução do volume molhado causa um impacto inicial severo (100/25), similar a não irrigação (100/0).

O guaranazeiro se manteve sem reduções do fluxo de seiva por 18 dias sem irrigação, em uma condição de demanda atmosféricas de até 2,5 mm dia⁻¹, porém, não é possível afirmar que o retorno da irrigação ao fim desse período evitaria a diminuição do seu potencial de fluxo de seiva.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. **Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper**, n. 56. Rome, 297 p. 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711 - 728, 2013.
- ATROCH, A. L.; DO NASCIMENTO FILHO, F. J. Guarana—Paullinia cupana Kunth var. sorbilis (Mart.) Ducke. In: **Exotic Fruits**. Academic Press, 2018. p. 225-236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00029-0>
- COSTA, R. S. C.; SOUZA, V. Recomendações técnicas sobre o cultivo de guaranazeiro. **Embrapa Rondônia-Recomendação Técnica (INFOTECA-E)**, 1999.
- ESPADAFOR, M.; ORGAZ, F.; TESTI, L., LORITE; I. J., GONZÁLEZ-DUGO, V.; FERERES, E. Responses of transpiration and transpiration efficiency of almond trees to moderate water deficits. **Scientia Horticulturae**, v. 225, p. 6-14, 2017.
- IBGE. Série histórica da estimativa anual da área plantada, área colhida, produção e rendimento médio dos produtos das lavouras. **IBGE**, 2020. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>.> Acesso em: 05/11/2020.
- INOUE, Y.; KIMBALL, B. A.; JACKSON, R. D.; PINTER JR, P. J.; REGINATO, R. J. Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 51, n. 1, p. 21-33, 1990.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014.

- GRANIER, A. 1985. A new method of sap flow measurement in tree stems. **Ann. Sci. For.** 42:193–200.
- HÖLTTÄ, T.; LINKOSALO, T.; RIIKONEN, A.; SEVANTO, S.; NIKINMAA, E. An analysis of Granier sap flow method, its sensitivity to heat storage and a new approach to improve its time dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 211, p. 2-12, 2015.
- LIMA, C. F.; MARINHO, C. S.; COSTA, E. S.; AMARAL, C. O. Qualidade dos frutos e eficiência produtiva da laranjeira 'Lima' enxertada sobre 'Trifoliata', em cultivo irrigado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 3, p. 401-405, 2014.
- LU, P.; URBAN, L.; ZHAO, P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. **ACTA BOTANICA SINICA-ENGLISH EDITION**, v. 46, n. 6, p. 631-646, 2004.
- PEREIRA, J. C. R. Cultura do guaranazeiro no Amazonas. **Embrapa Amazônia Ocidental**. Sistemas de Produção, 2005.
- SCHIMPL, F. C.; DA SILVA, J. F.; DE CARVALHO GONÇALVES, J. F.; MAZZAFERA, P. Guarana: revisiting a highly caffeinated plant from the Amazon. **Journal of ethnopharmacology**, v. 150, n. 1, p. 14-31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.08.023>
- SILVA, M. R.; MARTIN, T. N.; ORTIZ, S.; BERTONCELLI, P.; VONZ, D. Desempenho agrônomico de genótipos de milho sob condições de restrição hídrica. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 202-212, 2012.
- SOUZA, M. J.; RAMOS, M. M.; DE SIQUEIRA, D. L.; COSTA, L. C.; LHAMAS, A. J.; MANTOVANI, E. C.; SALOMÃO, L. C. Produção e qualidade dos frutos da limeira da limeira ácida 'T a ácida 'T a ácida 'Tahiti' submetida ahi' submetida a diferentes porcentagens de área molhada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 245-250, 2003.
- VASCONCELOS, D. V.; SOUSA, V. F. de; VIANA, T. V. de A.; AZEVEDO, B. M. de; SOUSA, G. G. de; CAVALCANTE JÚNIOR, J. A. H. INTERAÇÃO ENTRE NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO POTÁSSICA NA CULTURA DO MARACUJAZEIRO. **IRRIGA**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 160–170, 2012. <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n1p160>.

- VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 516-523, 2009.
- VELLAME, L. M.; JÚNIOR, F.; FELISBINO, E.; COELHO, R. D. Effect of partial soil wetting on transpiration, vegetative growth and root system of young orange trees. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 5, p. 377-384, 2015.
- WULLSCHLEGER, S. D.; HANSON, P. J.; TODD, D. E. Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. **Forest Ecology and Management**, v. 143, n. 1-3, p. 205-213, 2001.

CAPÍTULO III - BALANÇO DE ENERGIA DA FOLHA NO GUARANAZEIRO (*Paullinia Cupana*)

RESUMO

Esse trabalho teve como objetivo estimar a transpiração do guaranazeiro através do balanço de energia da folha, com medições de temperatura foliar em 5 horários distribuídos no dia, as 8, 10, 12, 14, 16 horas, assim como determinar a influência da quantidade de medições e escolha dos horários nas estimativas. Foram aplicados dois tratamentos em relação à irrigação, um controle e outro com suspensão de irrigação por 21 dias. Foi utilizado o método de Granier para a estimativa do fluxo de seiva. A absortividade da folha foi obtida através da minimização da soma dos quadrados dos erros do calor latente (LE) em relação ao fluxo de seiva. Foi comparada a representatividade de LE obtida com número de medições reduzidas em relação ao LE utilizando todos os horários medidos. A utilização de uma única folha para representar a transpiração de uma planta inteira pode trazer alguns problemas, como a redução da representatividade da mesma dentro da copa devido a senescência. O aumento do número de medições durante o dia melhora a estimativa, porém, medições em horários de baixa transpiração não representam bem o balanço de energia da folha, sendo indicadas medições em horários de alta taxa transpirava.

Palavras-Chave: temperatura foliar, fluxo de seiva, transpiração.

ABSTRACT

This work aimed to estimate the transpiration of the guarana tree through the energy balance of the leaf, with measurements of temperature of a single leaf of the canopy in 5 times distributed in the day, at 8, 10, 12, 14, 16 hours, as well determine the influence of quantity and choice of moments on estimates. Two treatments were applied in relation to irrigation, a control and another with irrigation suspension for 21 days. The Granier method was used to estimate the sap flow and the leaf absorptivity was obtained by reducing the sum of the square of the error in relation to this sap flow. Was compared the representativeness of latent heat (LE) obtained with reduced measures in relation to the LE using all measures. The use of a single leaf to represent the transpiration of an entire plant can bring some problems, such as the reduction of its representativeness within

the canopy due to senescence. The increase in the number of measurements improves the estimate, however, measurements at times of low transpiration do not represent well the energy balance of the leaf, being indicated measurements at times of high transpiration rate.

KEYWORDS: *leaf temperature, sap flow, transpiration.*

1. INTRODUÇÃO

O Guanazeiro (*Paullinia cupana*) é uma planta de origem amazônica, cujo fruto tem grande concentração de cafeína. Naturalmente tem crescimento escandente, se desenvolvendo em forma de um cipó ou liana até atingir o topo da floresta, mas quando cultivada em campo aberto tem a forma de arbusto, com no máximo três metros de altura (CAVALCANTE, 1976). Preferencialmente, deve ser cultivada em locais cuja temperatura média anual varie entre 23°C e 28°C, com precipitação anual entre 1500 mm e 3000 mm, com um período de seca definido, para que haja indução do florescimento (COSTA & SOUZA, 1999; PEREIRA, 2005).

Assim como grande parte dos seres vivos, as plantas controlam sua temperatura para manter em uma faixa ideal para o bom funcionamento de suas atividades biológicas, e como mecanismo para isso utilizam a transpiração. Na literatura se encontra uma faixa ótima de temperatura entre 25°C e 30°C (MACHADO et al., 2005). Já que temperaturas foliares acima de 30°C causam desorientação do sistema lamelar do cloroplasto e problemas no processamento de CO₂ (SMILLIE et al., 1978).

Ao sofrer estresse hídrico a planta tende a fechar seus estômatos para reduzir a perda de água; essa limitação na transpiração culmina na redução do resfriamento da superfície e no aumento da temperatura do dossel, logo a temperatura comparada ao ambiente pode ser utilizada como um indicador de déficit hídrico da planta (JACKSON, 1982).

Ao realizar o balanço de energia (BE) da folha deve-se levar em consideração alguns fatores e fontes de troca de energia, são elas: Absortividade da folha; Radiação solar direta e indireta (onda curta); Radiação terrestre (ondas longas); Radiação emitida pela folha; Trocas por condução e convecção; e

Energia latente (LE), componente do balanço que se converte em transpiração (GUTSCHICK, 2016).

A utilização do método de balanço de energia combinado com técnicas de sensoriamento remoto de alta resolução espacial e temporal, pode trazer praticidade, precisão e redução de custo se comparados a métodos tradicionais de estimativa do uso e demanda de água pela cultura (CHANDEL et al., 2020).

Esse trabalho teve como objetivo estimar a transpiração do guaranazeiro através do balanço de energia da folha, com medições de temperatura foliar em 5 horários distribuídos no dia, relacioná-lo com a radiação global e fluxo de seiva e verificar a influência da quantidade de medições e escolha dos horários nas estimativas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação com cobertura plástica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Município de Cruz das Almas, BA (12° 48' S; 39° 06' O; 225 m de altitude). Segundo a classificação de Köppen, avaliado por Alvares et al. (2013), o clima é tipo tropical quente e úmido (Af), sem estação seca definida. A precipitação média é de 1.224 mm por ano, com média anual da umidade relativa do ar acima de 82% e temperatura média de 24,5° C.

Foram utilizados 24 reservatórios de 0,5 m³ preenchidos com material da camada de 0-0,20 m de Latossolo Amarelo Distrocoeso e peneirado com malha de 0,005 m, cuja análise granulométrica está descrita na Tabela 8. A camada superior do reservatório, de 0,15 m de espessura, recebeu uma mistura com proporção de 1/6 de esterco bovino (v/v), como matéria orgânica. O sistema de drenagem constitui-se de uma camada de brita com 0,08 m de espessura, 0,01 m de areia lavada e uma tela de nylon separando essas duas camadas, sendo a água drenada por um orifício 0,025 m na parte inferior do reservatório.

Tabela 8. Análise granulométrica do solo expressa em g kg⁻¹.

AMG	AG	AM	AF	AMF	AT	Silte	Argila
43	215	272	186	51	767	27	206

*AMG – Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM – Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; AT – Areia total.

As mudas do guaranazeiro foram oriundas de sementes de plantas selecionada quanto à resistência a fitopatologias, tamanho das sementes e cacho (racemo) com frutos fecundados e facilidade de colheita manual pela retirada do cacho da planta quando atinge o ponto de colheita. As sementes foram lavadas para a retirada da massa branca e germinadas em areia lavada. Após a germinação, as plântulas foram selecionadas e transplantadas para recipientes de polietileno de 0,15 x 0,25 m preenchidos com uma mistura de Latossolo Amarelo e compostagem na proporção 2:1 com base em volume (v/v). Após 9 meses, as mudas de guaraná com 6 folhas definitivas foram transplantadas para o reservatório.

A irrigação do experimento foi realizada por um sistema de gotejamento, composto por um gotejador tipo botão de 4 L h⁻¹, ligado a 4 dispersores por reservatório. O manejo da irrigação foi realizado diariamente e o volume de água a ser irrigado era calculado de maneira que o solo retornasse a capacidade de campo (10kPa), sendo a umidade atual era calculada pela curva de retenção de água, cujo os parâmetros estão descritos na Tabela 4, e a tensão obtida através de tensiômetros instalado a 20 cm da planta e 20 cm de profundidade.

Tabela 9. Parâmetros da equação de Van Genuchten.

Θ_s	Θ_r	α	n	λ	K_s	R^2	RMSE
$m^3 m^{-3}$		m^{-1}			$m h^{-1}$		
0,472	0,022	5,5	1,52	0,008	3×10^{-3}	0,93	0,006

Foram aplicados dois tratamentos em relação à irrigação, um controle, em que as plantas continuam recebendo irrigação normalmente (100/100) e outro em que as plantas ficaram 21 dias sem receber irrigação (100/0), sendo 12 repetições para cada tratamento.

Os sensores de fluxo de seiva foram compostos por uma sonda de aquecimento e por uma sonda de referência (Figura 18). As sondas foram construídas no Laboratório de Instrumentação Agrícola, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFRB. Foram utilizadas agulhas de 0,001 m de diâmetro e 0,01 m de comprimento. As sondas aquecedoras tiveram a agulha envolvida por um fio de constantan, que foi utilizada como resistência para gerar calor e ambas as sondas tiveram em seu interior um termopar feito pela união de fios de cobre e constantan, ambos com 0,0005 m de diâmetro.

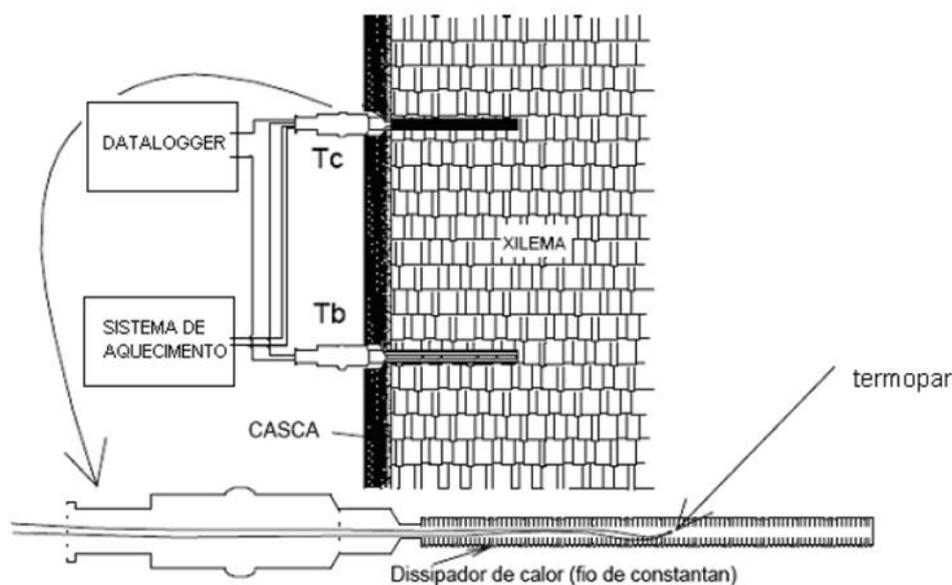


Figura 18. Esquema dos sensores do fluxo de seiva para o método da dissipação de calor.

Para instalar as sondas foram feitos 2 furos em direção radial, alinhados verticalmente e distanciados em 0,08 m, com o comprimento igual ao das sondas e um diâmetro ligeiramente maior. Para melhorar a condução de calor, as sondas foram revestidas com pasta térmica antes de serem inseridas. Por fim, foi efetuado um revestimento com papel alumínio em forma de saia, para reduzir o efeito térmico do exterior no seguimento do caule.

Para a coleta de dados utilizou-se um datalogger CR800 da Campbell SCI em associação com um multiplexador AM 16/32B também da Campbell SCI. Para o sistema de aquecimento foram utilizadas placas controladoras de tensão

desenvolvidas com a plataforma Arduino, as quais mantêm a potência aplicada nas sondas de aquecimento em $0,1 \text{ W.cm}^{-1}$, durante 24 horas por dia.

Para minimizar os efeitos das diferenças térmicas naturais (DTN) sobre as sondas, foi instalado mais um sensor de fluxo de seiva em uma planta na proximidade, na qual não se mediu o fluxo, e esta teve o aquecimento desligado durante todo o experimento e serviu de conjunto de referência. O aquecimento das demais sondas foi desligado por um período de 48 horas. Assim, foram medidas as diferenças térmicas entre as duas sondas sem aquecimento e, a partir daí foi gerado um modelo de estimativa por meio de regressão em função da variação do conjunto de referência (DTNe). Posteriormente, os dados obtidos foram corrigidos com base nesses modelos, através da seguinte equação (Equação 12).

$$\Delta T = \Delta T_m - DTNe \quad (12)$$

Em que:

ΔT - diferença térmica atual corrigida, °C;

ΔT_m - diferença térmica não corrigida, medida pela sonda, °C;

$DTNe$ - diferença térmica natural estimada para cada sonda, °C.

Foi utilizada a equação de Granier (1985) calibrada para a cultura, Equação 13, para estimativa do fluxo de seiva (SF).

$$SF = 0,000266 \left(\frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1,231} A_s \quad (13)$$

Em que:

ΔT_{max} - Diferença de temperatura a fluxo zero, quando somente ocorre perda de calor por condução, °C;

ΔT - Diferença de temperatura entre as duas sondas, °C;

A_s - Área da seção condutora, m².

A determinação da área condutora (AC) na seção do caule foi determinada através da Equação 14, que relaciona o diâmetro externo (d) da seção do caule e sua área condutora.

$$AC = 0,8847 d^2 - 0,9101 d + 0,5717 \quad (14)$$

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada através de dados de uma estação meteorológica instalada no interior da casa de vegetação, que obtém dados de temperatura, umidade do ar e radiação.

Foi utilizada a equação de Penman-Montheith para o cálculo da ET_o, onde foi considerado um valor fixo de velocidade do vento igual 0,5 m s⁻¹, como recomendado pelo Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998) para interiores de casa de vegetação.

Foi obtida a área foliar (LA) no início e no fim do tratamento de 21 dias, realizando-se a contagem do número de folhas e medindo o comprimento e largura de 20% das folhas. Vellame (2010) com a amostragem de 14,29% para citros, indicou um erro menor que 5% na estimativa da área foliar. Com o auxílio da Equação 15 foi calculada a área foliar média da planta, cujo coeficiente foi ajustado através de regressão de dados de altura e largura medidos com régua e de área foliar através do escaneamento de folhas. Essa área média foi multiplicada pelo número de folhas para obter a área foliar total da planta.

$$LA = 0,6932 CL \quad (15)$$

Em que:

C - Comprimento da folha (m);

L - Largura da folha (m);

Foi selecionada e marcada uma única folha saudável por planta, a uma altura média na copa e durante o tratamento de 21 dias, foram realizadas medições da temperatura foliar, essa obtida com o auxílio de um termômetro infravermelho de medição manual, com precisão 0,1 °C, a 0,1 m de distância da folha. Devido a condições de logística e disponibilidade de equipamento, foram

realizadas medições três dias por semana (segunda, quarta e sexta-feira) e cinco medições no dia, às 8, 10, 12, 14 e 16 horas, em três plantas de cada tratamento.

O cálculo da transpiração seguiu o fluxograma da Figura 19. Primeiramente foi utilizada a Equação 16 para a estimativa da energia utilizada pela folha para transpirar água (VELLAME et al., 2022), onde o primeiro termo é a energia absorvida pela folha, o segundo termo representa a energia emitida em forma de ondas longas e o último termo é a energia trocada com o ar através de condução e convecção (KNOERR & GAY, 1965; CAMPBELL & NORMAN, 1998).

Então foi utilizada a Equação 17 para integração da energia e transformar em volume transpirado, de forma que o somatório no final da equação estima o quanto as 5 medidas realizadas no dia representam o dia completo, comparando a energia utilizada para evaporar água do momento das medições com a radiação global, que é a sua principal fonte.

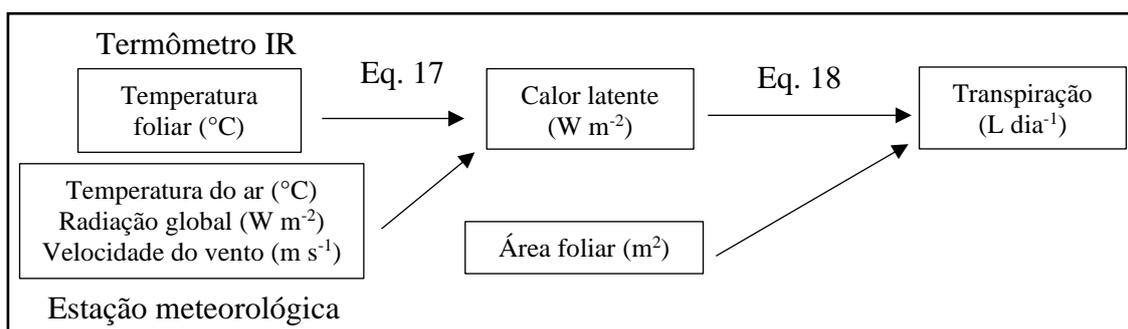


Figura 19. Fluxograma do cálculo da transpiração a partir do balanço de energia.

$$LE = \alpha Rg - 2 \varepsilon \sigma (T_f^4 - \varepsilon T_a^4) - K_a \frac{T_f - T_a}{K_f \sqrt{\frac{L}{w}}} \quad (16)$$

Em que:

LE – calor latente, energia utilizada para evaporar água ($W m^{-2}$);

α – absorptividade da folha para a radiação solar;

Rg – radiação solar global ($W m^{-2}$);

ε – emissividade para ondas longas (0,96);

σ – constante da Lei de Stefan-Boltzmann ($5,6704 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$);

T_f – temperatura da folha (K);

T_a – temperatura do ar (K);

K_a – condutividade convectiva-condutiva do ar ($0,0259 W m^{-1} K^{-1}$, Campbell & Norman, 1998);

K_f – parâmetro empírico do formato da folha, $0,0057 m s^{-0,5}$ (Knoerr & Gay, 1965);

L – largura da folha (m);

w – velocidade do vento ($m s^{-1}$).

$$T = \frac{Kt LA Rg_d \sum_{i=1}^n LE_i}{L_v \sum_{i=1}^n Rg_i} \quad (17)$$

Em que:

Kt - constante de conversão de unidade ($0,0036 J L W^{-1} Kg^{-1}$)

T – transpiração da planta no dia ($L dia^{-1}$);

L_v – calor latente específico de evaporação ($2,45 \cdot 10^6 J kg^{-1}$);

LA – área foliar da planta no dia (m^2);

n – número de medidas de temperatura no dia;

Rg_d – radiação global total do dia ($W m^{-2}$);

Rg_i – radiação global no momento i da medida de temperatura ($W m^{-2}$);

LE_i – energia utilizada para a transpiração referente à medida i ($W m^{-2}$).

A absorptividade (α) foi obtida através da minimização da soma dos quadrados dos erros em relação ao fluxo de seiva na escala diária.

Devido a estrutura da planta e a quantidade de radiação difusa dentro da casa de vegetação (Figura 20), foi considerado que em média todas as folhas da planta recebem uma quantidade aproximadamente igual de radiação no dia. Assim o LE foi multiplicado pela área foliar da planta e com isso foi calculada a transpiração da planta em $L \text{ dia}^{-1}$.



Figura 20. Estrutura do guaranazeiro e condições dentro da casa de vegetação.

Além do balanço de energia, comparou-se a temperatura foliar com a temperatura do ar como índice de déficit hídrico.

Foi realizada uma análise da influência da escolha dos horários das medidas de temperatura na estimativa LE, onde foram relacionados estimativa de diversas combinações dos horários dentre os disponíveis e a estimativa com todos os 5 horários. De maneira, foi comparada a representatividade do LE obtida com horários reduzidos e em relação ao LE utilizado todos os horários medidos.

Para isso, foram usados os índices estatísticos: Média, Desvio Padrão, Incerteza (Equação 18) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 19).

$$I = \frac{S}{\sqrt{n}} * t \quad (18)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (19)$$

Em que:

I – incerteza (%);

S – desvio padrão das medições (%);

t – coeficiente de Student para 95% de confiabilidade;

n – número de medições;

$RMSE$ – raiz do erro quadrático médio ($L \text{ dia}^{-1}$);

X – valor observado ($L \text{ dia}^{-1}$);

Y – valor estimado ($L \text{ dia}^{-1}$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 21 observa-se a variação da diferença entre a temperatura do ar e a temperatura média nas folhas, para os momentos em que foram realizadas medições das temperaturas foliares, no intervalo dos 21 dias. Foi possível identificar os picos de radiação e temperatura acontecendo às 12:00 ou 14:00 horas, assim como uma boa relação entre a radiação global do horário e a diferença entre a temperatura da folha e do ar, devido à maior eficiência de absorção de energia pelo material, comprovado na Figura 22.

Observou-se um distanciamento das curvas de diferença de temperatura do tratamento controle e o que não recebeu irrigação com o passar do tempo. Esse distanciamento se torna evidente a partir do dia 25 de agosto, decimo quarto dia de tratamento, como evidenciado na Figura 23. Essa diferença da temperatura foliar média diária entre os dois tratamentos, mostra indícios de estresse hídrico. Uma diminuição no estado hídrico da planta leva a uma redução na transpiração foliar, como resultado da regulação ativa da abertura estomática, conseqüentemente aumentando a temperatura foliar devido a um resfriamento evaporativo reduzido (INOUE et al., 1990).

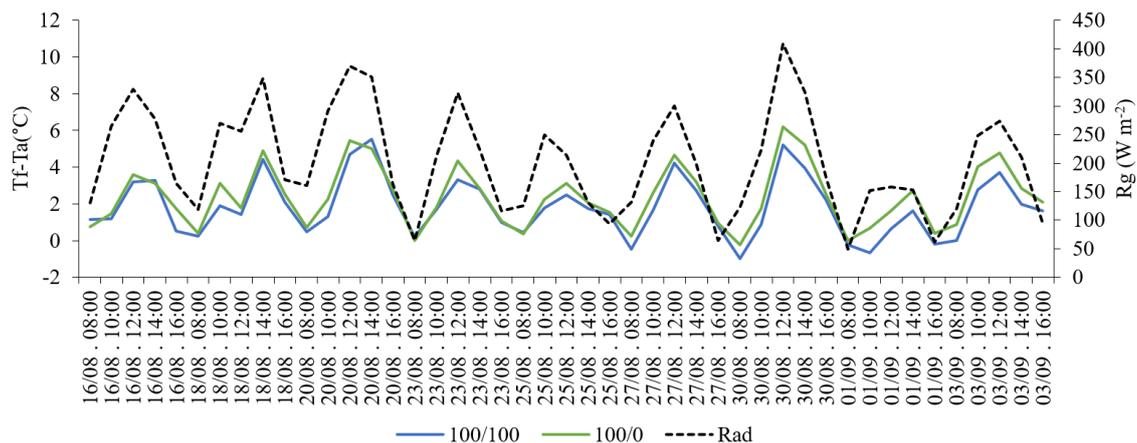


Figura 21. Média da diferença entre a temperatura da folha e do ar para os dois tratamentos e radiação global (Rg).

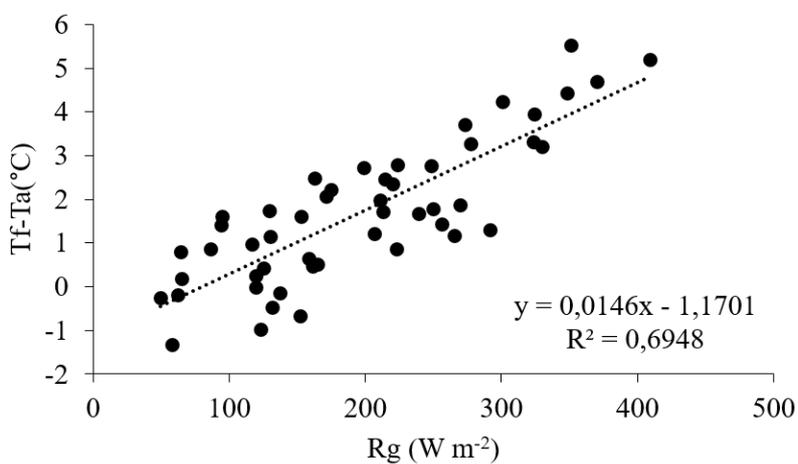


Figura 22. Relação entre a radiação global e a diferença de temperatura entre o ar e folha do tratamento controle.

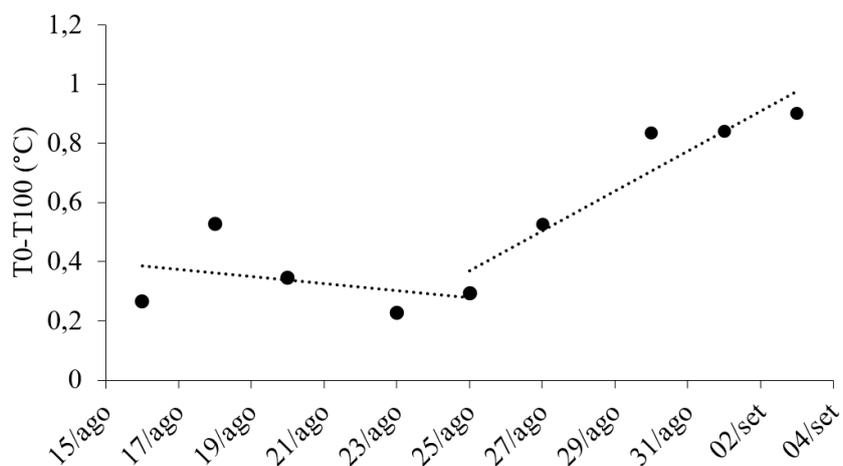


Figura 23. Diferenças entre médias diárias de temperatura foliar do tratamento sem irrigação (T0) e o controle (T100).

A absorvidade média da folha (α) estimada foi 0,69, um valor alto comparado com o que é comumente encontrado na literatura, que varia normalmente entre 0,40 e 0,60 (CAMPBELL & NORMAN, 1998). Esse resultado fora do padrão pode ser explicado pelo uso de uma única folha para extrapolar a transpiração de toda a planta.

Na Figura 24 observa-se o curso dos componentes da energia do balanço de energia no período, sendo eles: Absorção de energia (onda curta e longa) (Q), Energia de onda longa emitida pela folha (R), perda de energia por convecção (C) e saldo de energia utilizada na transpiração, calor latente (LE). Sendo C e LE descritos em porcentagem da Q. Grande parte da energia absorvida pela folha é perdida em forma de onda longa (R), apenas uma pequena parcela é perdida por convecção (C), até 4,5%, e outra pequena parcela é utilizada para transpiração (LE), que em média representa 6,5% da absorção.



Figura 24. Componentes do Balanço de energia no tempo.

A Figura 25 apresenta o curso da Radiação global, transpiração calculada pelo balanço de energia e o fluxo de seiva do tratamento controle para os horários que foram realizadas as medições de temperatura. Foi possível identificar uma boa relação entre as variáveis.

No dia 01/09 houve uma redução na Rg e conseqüentemente na transpiração estimada, mas o fluxo de seiva se manteve tão alto quanto nos dias anteriores, porém, na próxima bateria de medições, realizadas no dia 03/09, houve uma redução no fluxo de seiva acompanhando em grandeza as outras

variáveis. Esse acontecimento pode estar relacionado as diferenças naturais entre as duas variáveis devido ao armazenamento de água da planta (ALARCÓN, 2000).

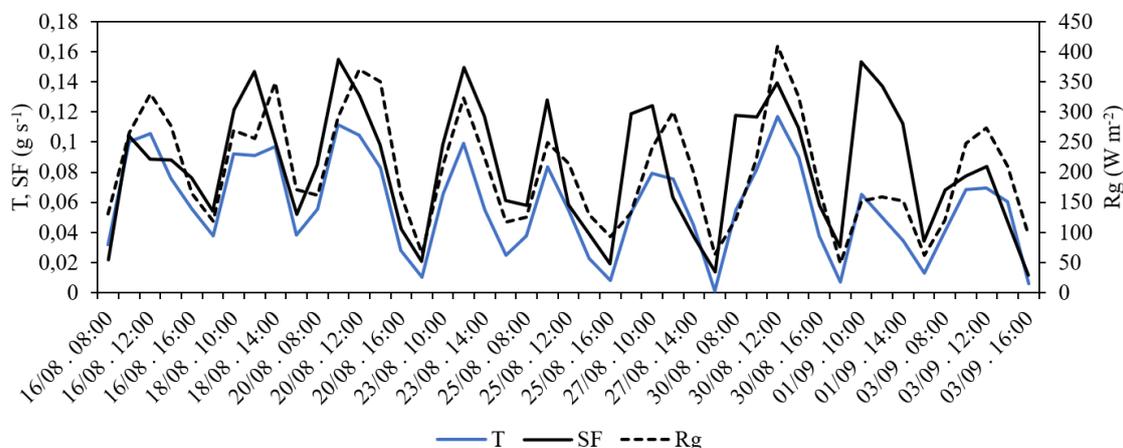


Figura 25. Radiação global, fluxo de seiva e transpiração pelo BE do tratamento 100/100.

O curso diário da evapotranspiração de referência, fluxo de seiva do tratamento controle e a transpiração calculada pelo balanço de energia para os dois tratamentos numa escala diária podem ser observados na Figura 26. É facilmente visível uma relação entre todas as variáveis, mas existe um comportamento de queda da transpiração calculada pelo balanço de energia comparado ao fluxo de seiva.

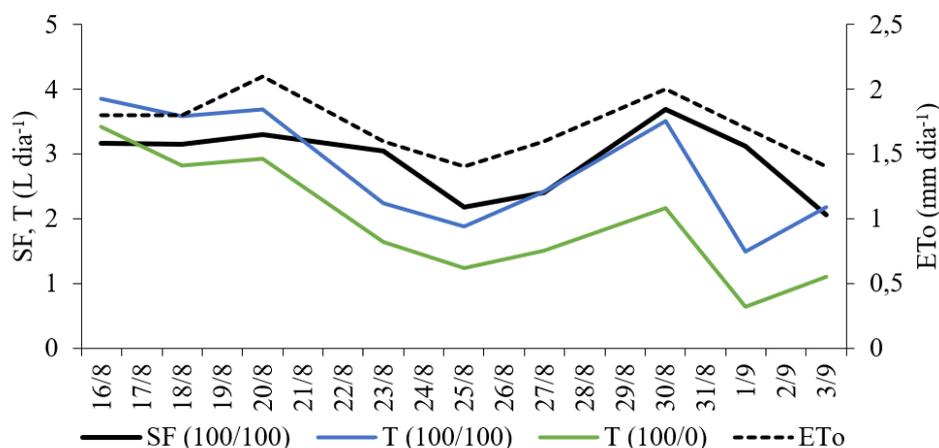


Figura 26. Evapotranspiração de referencia (ETo), fluxo de seiva (100/100) e transpiração média diária calculada pelo balanço de energia para os dois tratamentos.

Ao estudar o quociente da transpiração obtida pelo balanço de energia com o fluxo de seiva (Figura 27), que pode ser considerado como a representatividade da transpiração da folha em relação ao fluxo total da planta, é possível identificar com mais clareza o comportamento de queda. Isso indica que a folha perde o poder de transpiração com o passar do tempo e se torna menos representativa na copa, até que atinja a senescência, caia e seja substituída por novas folhas (SOBRADO, 1994). E como só foi identificado um comportamento de queda, é deduzido que essa folha não estava no seu potencial transpirativo máximo e que outras folhas da copa estavam com um potencial maior que a folha medida.

Esse fato é um complicador no ajuste da absorvidade das folhas da copa (α), já que esse parâmetro foi estimado pelo estado médio da folha durante o período e pode não representar bem a copa em um longo período, sendo aconselhável medir a temperatura de diversas folhas na copa, de maneira que a média dessas represente melhor a copa. Houve um comportamento de queda mais intenso no tratamento sem irrigação, mostrando que o déficit agiliza o processo de senescência da folha.

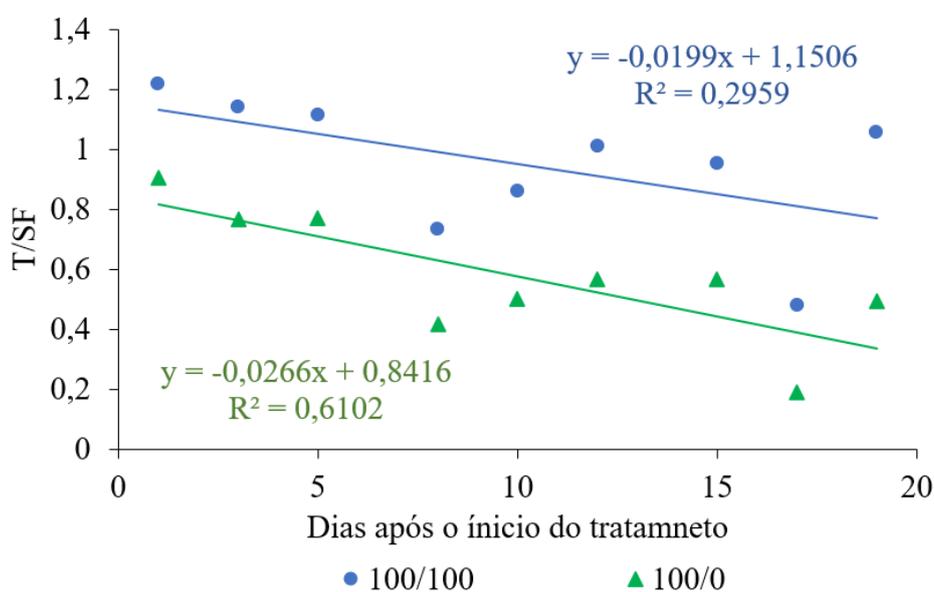


Figura 27. Quociente entre a transpiração estimada pelo Balanço de energia e o fluxo de seiva no tempo.

A Tabela 10 apresenta a representatividade do LE obtida com horários reduzidos e em relação ao LE utilizando todos os horários em que foram realizadas medições de temperatura. Foi observado que ao utilizar apenas um horário no dia para estimar a LE, as medições às 8:00, 10:00 e 12:00 superestimaram, enquanto medidas às 14:00 e 16:00 subestimam. A posição da folha na copa pode ter influenciado nas superestimativas pela manhã e subestimativas a tarde. Esse comportamento foi observado por Qiu et al. (2020) quando estudou balanço de energia de uma planta com medições tridimensional, e atribuiu esse resultado a direção do sol e sombreamento da própria planta e plantas vizinhas. Sendo esse mais um complicador da utilização de apenas uma folha.

Já para as combinações de horários, as subestimativas máximas foram de 12,4% e superestimativas máximas foram de 4,5%, sendo que as combinações que utilizam o horário de 16:00 tendem a subestimar.

É notável que o aumento do número de medidas melhora os coeficientes estatísticos, e que medições próximas ao meio-dia são mais significativas, já que o horário mais representativo no dia é as 12:00, com resultados muito superiores as outras únicas medidas no dia, de maneira que a combinação dos horários de 10:00, 12:00 e 14:00 apresentou melhores resultados.

Os piores resultado estatísticos foram obtidos com os horários de 8:00 e 16:00, o que indica que o método não funciona bem para horários de baixa transpiração e radiação. Isto ocorre dada em grande parte das diferenças de temperatura entre o ar e a folha, nesses momentos, não estão ligadas a transpiração, nesses momentos, o balanço de energia de uma folha é dominado pela troca de radiação de onda longa e troca de calor por convecção (JORDAN & SMITH, 1994). O controle da saída de água pela planta ocorre em condições de maior demanda da atmosfera, sendo assim, esses horários devem ser priorizados para realização de medidas que representem o dia.

Tabela 10. Análise da influência do horário e número de medições na estimativa da transpiração.

	Horários das medidas de temperatura										
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	8/12/16	8/16	10/14	10/12/14	8/10/12/14	10/12/14/16
Est. Média	108,4%	119,3%	102,6%	89,0%	63,1%	96,1%	87,6%	104,1%	103,5%	104,5%	98,5%
Desvio Padrão	30,2%	9,1%	6,4%	8,9%	23,9%	3,0%	10,4%	2,9%	2,6%	2,4%	3,4%
Incerteza	17,5%	5,3%	3,7%	5,1%	13,8%	1,7%	6,0%	1,7%	1,5%	1,4%	1,9%
RMSE (L dia⁻¹)	1,24	0,85	0,3	0,54	1,68	0,17	0,54	0,18	0,15	0,2	0,15

4. CONCLUSÃO

A utilização de uma única folha para representar a transpiração de uma planta inteira pode trazer alguns problemas, como a redução da representatividade da mesma na copa, devido a senescência e a sua posição dentro da copa em relação a radiação solar.

O aumento do número medições ao longo do dia melhora a estimativa, porém, medições em horários de baixa transpiração não representam bem o balanço de energia da folha nas condições do experimento, sendo indicadas medições em horários de alta radiação e taxa transpirava.

Foi indicado que para uso prático da metodologia apresentada, como em voos de drone, a medição da temperatura foliar deve ser realizada num horário próximo a 12:00 h, ou de máxima radiação solar, e que englobe a maior área da copa possível.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. **Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper**, n. 56. Rome, 297 p. 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711 - 728, 2013.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. Radiation fluxes in natural environments. In: **An introduction to environmental biophysics**. Springer, New York, NY, 1998. p. 167-184.
- CAVALCANTE, P. B. **Frutas Comestíveis da Amazônia 3**. 1979.

- CHANDEL, A. K.; MOLAEI, B.; KHOT, L. R.; PETERS, R. T.; STÖCKLE, C. O. High resolution geospatial evapotranspiration mapping of irrigated field crops using multispectral and thermal infrared imagery with metric energy balance model. **Drones**, v. 4, n. 3, p. 52, 2020.
- COSTA, R. S. C.; SOUZA, V. Recomendações técnicas sobre o cultivo de guaranazeiro. **Embrapa Rondônia-Recomendação Técnica (INFOTECA-E)**, 1999.
- INOUE, Y.; KIMBALL, B. A.; JACKSON, R. D.; PINTER JR, P. J.; REGINATO, R. J. Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 51, n. 1, p. 21-33, 1990.
- GRANIER, A. 1985. A new method of sap flow measurement in tree stems. **Ann. Sci. For.** 42:193–200.
- GUTSCHICK, V. P. Leaf energy balance: basics, and modeling from leaves to canopies. In: *Canopy photosynthesis: From basics to applications*. Springer, Dordrecht, 2016. p. 23-58.
- JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress in: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982, p. 43-45.
- JORDAN, D. N.; SMITH, W. K. Energy balance analysis of nighttime leaf temperatures and frost formation in a subalpine environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 71, n. 3-4, p. 359-372, 1994.
- KNOERR, K. R.; GAY, L. W. Tree leaf energy balance. **Ecology**, v. 46, n. 1-2, p. 17-24, 1965.
- MACHADO, E. C.; SCHMIDT, P. T.; MEDINA, C. L.; RIBEIRO, R. V. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 40, n. 12, p. 1161-1170, 2005.
- PEREIRA, J. C. R. Cultura do guaranazeiro no Amazonas. **Embrapa Amazônia Ocidental**. Sistemas de Produção, 2005.
- QIU, G. Y.; YU, X.; WEN, H.; YAN, C. An advanced approach for measuring the transpiration rate of individual urban trees by the 3D three-temperature model and thermal infrared remote sensing. **Journal of Hydrology**, v. 587, p. 125034, 2020.

- SMILLIE, R. M.; CRITCHLEY, C.; BAIN, J. M.; NOTT, R. Effect of growth temperature on chloroplast structure and activity in barley. *Plant Physiology*, v. 62, n. 2, p. 191-196, 1978.
- SOBRADO, M. A. Leaf age effects on photosynthetic rate, transpiration rate and nitrogen content in a tropical dry forest. ***Physiologia Plantarum***, v. 90, n. 1, p. 210-215, 1994.
- 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.

CONCLUSÃO GERAL

A relação entre área foliar, fluxo de seiva e ETo varia com o desenvolvimento da planta de guaraná e existem diferenças nos processos de transpiração e fluxo de seiva em escalas temporais diárias, que podem influenciar a eficiência do manejo da irrigação uma vez que a irrigação visa repor a água retirada do solo o que pode não corresponder em alguns casos a água evapotranspirada.

O volume de solo molhado tem grande influência na dinâmica da água para a cultura, porém, a mesma pode ser irrigada com uma área molhada reduzida. Exigindo cuidados na irrigação localizada durante os veranicos em regiões úmidas, já que a cultura sofre um grande impacto no período inicial da redução da área molhada. São necessário estudos futuros em relação a área molhada mínima para o bom desenvolvimento e produtividade da cultura em diversos estágios de crescimento e condições pluviométricas.

A temperatura foliar associada ao método de balanço de energia da folha pode estimar a transpiração do guaranazeiro mesmo com medidas descontínuas, podendo ser utilizada em tecnologias de sensoriamento remoto para o auxílio do manejo da irrigação. Demandando cuidados nos horários de obtenção das temperaturas.