

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS MICROMETEOROLÓGICOS
PARA ESTIMATIVAS DE CALOR SENSÍVEL E UMIDADE RELATIVA

MÁRIO SÉRGIO PAIVA DE ARAÚJO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE

DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

FEVEREIRO– 2020

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS MICROMETEOROLÓGICOS
PARA ESTIMATIVAS DE CALOR SENSÍVEL E UMIDADE RELATIVA

MÁRIO SÉRGIO PAIVA DE ARAÚJO

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal

Orientador: Prof. Elias Fernandes de Sousa

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO-2020

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

A663 Araújo, Mário Sérgio Paiva de.

Desenvolvimento de sistemas micrometeorológicos para estimativas de calor sensível e umidade relativa / Mário Sérgio Paiva de Araújo. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2020.

97 f. : il.
Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2020.
Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

1. surface renewal. 2. eddy covariance. 3. psicrômetro. 4. tubo de Mariotte. 5. baixo custo.
I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS MICROMETEOROLÓGICOS
PARA ESTIMATIVAS DE CALOR SENSÍVEL E UMIDADE RELATIVA

MÁRIO SÉRGIO PAIVA DE ARAÚJO

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal

Aprovada em 20 de fevereiro de 2020

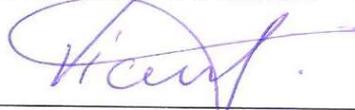
Comissão examinadora:



Prof. Ricardo Ferreira Garcia – UENF



Prof. Claudinei Martins Guimarães – UENF



Prof. Vicente de Paulo Santos Oliveira – IFF



Prof. Flávio Gonçalves Oliveira – UFMG



Prof. Elias Fernandes de Sousa – UENF
(orientador)

DEDICATÓRIA

Dedico este Doutorado aos meus pais, Hélio e Ester, aos meus irmãos Lorena, Claudia, Luís Henrique e à minha namorada Laura por terem me apoiado em todas as minhas escolhas e decisões.

A Vitória desta conquista dedico com todo meu amor, unicamente, a vocês! Parabéns!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu DEUS, por estar sempre ao meu lado;
Aos meus pais Hélio e Ester, que sempre me apoiaram, essa vitória é de vocês!

À minha namorada Laura Vieira, que esteve comigo durante todas as tribulações do doutorado, te amo!

Ao Prof. Elias Fernandes de Sousa da UENF, pela orientação no mestrado e doutorado e por sempre ter acreditado em mim e no potencial deste trabalho;

Ao Prof. Flavio Gonçalves de Oliveira da UFMG, pela coorientação no doutorado, pela orientação na graduação e pelo apoio acadêmico e profissional nos últimos 11 anos;

Ao Prof. Daniel Carvalho da UFRRJ pela coorientação no mestrado e apoio no doutorado, e pela grande influência que exerceu na minha trajetória profissional;

Agradeço pelos três grandes orientadores que tive ao longo da minha trajetória acadêmica. Fico feliz que os orientadores que tanto admirava se tornaram meus grandes amigos!

Ao Prof. Claudio Marciano da UENF pela recepção, apoio e boa vontade com minha pessoa nos dias que entrei no doutorado, além de dicas úteis para este trabalho;

Ao Prof. Pedro Amorim Berbert, pela amizade e companheirismo durante as atividades do LEAG;

Ao Prof. Ricardo Garcia e Prof. José Carlos Mendonça pelas dicas sugeridas, pela amizade e pelas conversas descontraídas durante o dia a dia no LEAG;

Agradeço aos meus colegas de laboratório (Karine, Antonione, Jean, Rodolpho, Clinimar, Pacelli) pelo convívio, suporte, conversas construtivas e ensinamentos;

Ao Marcelo Muniz pela ajuda no experimento e pela amizade de longa data;

Agradeço especialmente ao Claudio Martins, pela ajuda durante esse doutorado e principalmente pela sua amizade. Você vai longe cara!

A todos os professores e colegas da Pós-graduação, muito obrigado pela companhia!

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, pela bolsa de auxílio financeiro que possibilitou a elaboração deste trabalho;

Agradeço a Universidade Federal de Minas Gerais, a Fazenda Saara, a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, e a Associação de Produtores de Limão e outras Frutas - ASLIM pela disponibilização do espaço e o compartilhamento dos dados da estação local, assim como informações sobre a cultura;

Muito obrigado a todos vocês que tornaram essa etapa da minha vida mais feliz e vitoriosa!

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Evapotranspiração de referência, evapotranspiração da cultura e coeficiente da cultura	3
2.2 Razão de Bowen.....	6
2.2.1 Psicrômetros.....	10
2.3 Eddy covariance	12
2.4 Método aerodinâmico.....	14
2.5 Surface renewal analysis	15
3. TRABALHOS.....	22
3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA ESTIMATIVA DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL UTILIZANDO COMPONENTES DE BAIXO CUSTO ...	22
3.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE SURFACE RENEWAL PARA ESTIMATIVA DE CALOR SENSÍVEL EM CULTIVO DE LIMA-ÁCIDA “TAHITI”	42
3.3 DESENVOLVIMENTO DE PSICRÔMETROS ASPIRADOS COM SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS EM NUVEM ...	60
4. RESUMOS E CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

RESUMO

ARAÚJO, M. S. P. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro de 2020. Desenvolvimento de sistemas micrometeorológicos para estimativas de calor sensível e umidade relativa. Professor Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

A necessidade da obtenção de parâmetro meteorológico para o manejo adequado da água na agricultura tem motivado a busca por métodos e equipamentos que possibilitem a utilização de forma racional e ao mesmo tempo que seja acessível ao produtor rural. Seguindo esse pensamento, objetivou-se com esse trabalho desenvolver e calibrar equipamentos micrometeorológicos de baixo custo, de forma que possa ser empregado a campo. Os equipamentos foram desenvolvidos no laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes, RJ, seguindo diferentes metodologias para cada equipamento. No primeiro trabalho desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados para estimar o fluxo de calor sensível utilizando as metodologias de surface renewal e eddy covariance, sendo que os desempenhos das leituras foram analisados com auxílio de equipamento comercial. O sistema foi desenvolvido utilizando componentes de baixo custo, sendo testado sobre cultivo de feijão em uma área lisimétrica e sobre um cultivo de lima ácida-Tahiti em uma área monitorada por uma estação comercial de eddy covariance, ambas no norte de Minas Gerais. O sistema de aquisição de dados apresentou resultados satisfatórios para a estimativa do calor sensível utilizando a metodologia de surface renewal. E, para leituras utilizando o método de eddy covariance, o sistema teve a

eficiência prejudicada devido às limitações do modelo de anemômetro utilizado. No segundo, foi realizada a calibração e validação em diferentes alturas e tempos de retorno do método de surface renewal para estimativa do calor sensível no cultivo de lima ácida Tahiti no norte de Minas Gerais. A calibração foi realizada nos dias 19 a 26 de outubro de 2018 e foram adotadas duas diferentes alturas e oito diferentes tempos de retorno. A validação foi realizada entre os dias 16 e 27 de novembro de 2018. Os fatores de calibração variaram de 1,313 a 8,9676 com R^2 de 0,75 a 0,80 para altura de 0,4 m e de 0,5743 a 4,6619 com R^2 de 0,66 a 0,82 para altura de 0,8 m. Para as alturas de 0,4 m e 0,8 m, os melhores tempos de retorno observados foram de 0,25 s e 0,5 s, respectivamente. E, o terceiro e último trabalho, foi a construção e calibração de psicrômetros com sistema de aquisição e armazenamento de dados em nuvem utilizando componentes de baixo custo. Foram produzidos dois psicrômetros de ventilação forçada conectados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados em nuvem. A calibração foi realizada para as temperaturas de bulbo seco e úmido com auxílio de um psicrômetro aspirado de calibração, em seguida os dados ajustados foram utilizados para averiguar os resultados de déficit de pressão de vapor, umidade relativa, grau de saturação e volume específico. Os psicrômetros com leituras ajustadas apresentaram boas correlações com o psicrômetro aspirado em todas as averiguações com R^2 de 0,95, 0,90, 0,96 e 0,90 para as correlações de déficit pressão de vapor, grau de saturação, volume específico e umidade relativa.

ABSTRACT

ARAÚJO, M. S. P.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. February, 2020. Development of micrometeorological systems for sensitive heat and relative humidity estimates. Advisor: Elias Fernandes de Sousa.

The need to obtain meteorological parameters for the adequate management of water in agriculture has motivated the search for methods and equipment that enable the use in a rational way and at the same time is accessible to the farmer producer. Therefore, the objective of this work was to develop and calibrate low-cost micrometeorological equipment, so that it can be used in the field. The equipment was developed in the Agricultural Engineering laboratory of the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, in Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil, following different methodologies for each equipment. The first work, was carried out in order to develop a data acquisition system to estimate sensible heat flow using surface renewal and eddy covariance theory, analyzing its performance with the commercial equipment performance. The system was developed using low cost components and was tested on bean cultivation in a lysimetric area and on a 'Tahiti' lime cultivation in an area monitored by a commercial eddy covariance station, both in the north of Minas Gerais, Brazil. The system presented satisfactory results for the estimation of sensible heat flux using the surface renewal method. And for readings using the eddy covariance method, the system was impaired due to the limitations of the anemometer model used. In the second work, was to perform a calibration and validation at different heights and return times of the surface renewal method to estimate the sensitive heat in 'Tahiti'

lime cultivated in northern Minas Gerais, Brazil. The calibration was performed from October 19 to 26, 2018 and two different heights and eight different return times were adopted. The validation was performed between November 16 and 27, 2018. Calibration factors ranged from 1,313 to 8,996 with R^2 from 0.75 to 0.80 for a height of 0.4 m and from 0.5743 to 4,6619 with R^2 from 0.66 to 0.82 to a height of 0.8 m. For heights of 0.4 m and 0.8 m, the best observed return times were 0.25 and 0.5 s, respectively. And the third and last work, was the construction and calibration of psychrometers with cloud data acquisition and storage system using low cost components. Calibration was performed for dry and wet bulb temperatures with the aid of an aspirated calibration psychrometer. Afterwards, the adjusted data were used to ascertain the results of vapor pressure deficit, relative humidity, degree of saturation and the specific volume. The psychrometers with adjusted readings showed good correlations with the aspirated psychrometer in all analyzes with an R^2 of 0.95, 0.90, 0.96 and 0.90 for the correlations of vapor pressure deficit, degree of saturation, specific volume and relative humidity.

1. INTRODUÇÃO

A constante demanda de água na agricultura aliada a atual escassez hídrica, torna necessária a otimização da água nos cultivos. A principal maneira de otimizar o consumo hídrico em plantios irrigados é acompanhando e repondo as taxas de evapotranspiração da cultura (ET_c) durante todo o ciclo. A obtenção de informações das taxas da evapotranspiração da cultura (ET_c) é importante para avaliar a distribuição e a frequência dos déficits hídricos, além de contribuir para a utilização mais racional da água em uma determinada cultura em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico (Silva et al., 2014). Sabendo-se os valores de ET_c é possível encontrar os coeficientes de cultivo (K_c) para cada fase fenológica da planta, sendo uma maneira eficaz de melhorar o planejamento e o manejo da irrigação (Kar et al., 2007). Existem alguns métodos para estimativa da ET_c, e a escolha de qual deve-se utilizar depende da praticidade, do custo e da precisão (Silva et al., 2015). Os mais relevantes são a lisimetria (método padrão), a eddy covariance (EC) e a Razão de Bowen (RB).

A EC é um método que mede a ET_c em tempo real, analisando a troca de escalares entre a planta e os turbilhões de ar próximo da copa, sendo necessárias leituras em alta frequência (por exemplo, 8-10 Hz ou superior) da velocidade do vento em um campo tridimensional e do escalar de interesse. Isto geralmente requer anemometria sônica, que utiliza equipamento de alto custo. O escalar também requer sensores complexos e caros (Drexler et al., 2004).

O alto custo dos equipamentos finda por inviabilizar o uso deles na agricultura. Por isso, pesquisas que visam o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas práticas e baratas de medição e estimativa são muito importantes.

Entre essas técnicas a Surface Renewal (SR) surge como uma forma mais acessível ao produtor individual devido a simplicidade e menor custo de implantação (Rosa e Tanny, 2015). A SR se baseia na medição de temperatura do ar de alta-frequência perto ou acima do dossel da planta (Paw e Brunet, 1991). O ar próximo ao dossel é continuamente trocado, acarretando uma variação do fluxo de calor de acordo com a variação da temperatura do ar. Esse método utiliza termopares, que são sensores relativamente baratos e de fácil manuseio, com amostragem da temperatura em alta frequência.

A determinação da umidade relativa também é outro fator importante, pois influencia na produção agrícola, além de interferir no bem-estar dos seres humanos e no armazenamento de produtos (Marin et al., 2001). O psicrômetro é um equipamento amplamente utilizado para determinar essa umidade e seu princípio consiste na medição de temperatura de um par de termômetros, em que um deles mede a temperatura do ar livre, chamado de bulbo seco, e o outro é coberto com uma mecha de algodão umedecida e sua medida de temperatura depende da concentração de vapor na atmosfera (Ustymczuk e Giner, 2011; Cunha e Volpe, 2014).

A constante necessidade de estimativas de parâmetros micrometeorológicos aliadas aos altos custos dos equipamentos de medição, requer a criação e adaptação de equipamentos com custo relativamente inferior e mais acessível aos produtores e pesquisadores. A construção de sensores de baixo custo em laboratório e a sua validação em uma cultura de interesse regional justificam esse trabalho. Portanto, o objetivo deste trabalho foi a construção e calibração de equipamentos micrometeorológicos, com componentes de baixo custo, para estimativas de calor sensível e umidade relativa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração de referência, evapotranspiração da cultura e coeficiente da cultura

A evapotranspiração representa o total de água evaporada contida na atmosfera sobre uma superfície vegetada, é a junção do termo evaporação, correspondente à água evaporada da superfície do solo, mais o termo transpiração, correspondente à água evaporada proveniente da planta (Allen et al., 1998). A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do processo de troca de energia entre a superfície e a atmosfera, tendo sido bastante estudada devido a sua influência no ciclo de água e de nutrientes dos ecossistemas agrícolas e na produtividade primária das culturas (Da Silva et al., 2013). Informações quantitativas da evapotranspiração são necessárias em vários campos das ciências que tratam do manejo da água, como planejamento, construção e operação de reservatórios (Silva et al., 2003). Além disso, estimativas precisas da evapotranspiração podem resultar em menores gastos com recursos hídricos e financeiros, tanto no planejamento quanto no manejo de áreas irrigadas (Lecina et al., 2003).

A evaporação é o processo pelo qual a água é convertida da fase líquida para a fase de vapor, removendo-a de superfícies evaporantes como, oceanos, lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação úmida (Allen et al., 1998). Para que as moléculas de água passem para o estado de vapor, uma quantidade de energia é

necessária, a qual provém basicamente da radiação solar, que é considerada o principal elemento climático que controla a evapotranspiração quando a água não é fator limitante. Além disso, a evaporação é dependente da diferença entre a pressão de vapor da água na superfície evaporante e na atmosfera, provocada pela constante movimentação das massas de ar que envolvem a superfície, dificultando, desta forma, a saturação desta camada (Cruz, 2005).

A transpiração representa a água transferida ou perdida pela vegetação para a atmosfera, através dos estômatos da planta, decorrente das ações físicas e fisiológicas dos vegetais (Villela e Mattos, 1975). A vaporização ocorre no interior da folha, em espaços intercelulares, e é controlada pela abertura estomática (Allen et al., 1998). Da mesma forma que a evaporação, a transpiração depende do gradiente de pressão de vapor entre o vegetal e a atmosfera, e também do vento. Além disso, fatores como a capacidade do solo de conduzir água, favorecendo a absorção desta pelas raízes, características da planta e seu estágio de desenvolvimento e práticas de cultivo também influenciam o processo. Em uma superfície vegetada, os processos da evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente (Viana, 2000), tornando-se muitas vezes difícil a separação dos dois processos físicos.

Na fase de pós-plantio, quando a superfície vegetada ainda é muito pequena e conseqüentemente a área foliar, a evaporação é o componente mais importante. A partir daí, com o aumento da cobertura do solo pela planta, a transpiração se torna o componente principal, podendo ser responsável por até 90% do processo de evapotranspiração. (Cruz, 2005).

A quantificação do fluxo de vapor d'água para a atmosfera proveniente de superfícies úmidas combinada com a transpiração das plantas em áreas cultivadas, é denominada de evapotranspiração da cultura (ETc). Matzenauer et al. (1998) definem evapotranspiração de uma cultura em função, basicamente, das condições meteorológicas que ocorrem durante o ciclo de desenvolvimento das plantas. Assim, os fatores que exercem maior influência são aqueles relacionados à demanda evaporativa da atmosfera. A evapotranspiração, portanto, determinada em condições específicas de um local, ano e/ou época de semeadura, não pode ser extrapolada para outras situações em valores absolutos.

Existem vários métodos de estimação da evapotranspiração dos cultivos (ETc), alguns simples e outros mais complexos (Mantovani et al., 2007). Alguns

métodos fazem a medição direta da evapotranspiração, como os lisímetros, balanço hídrico do solo e correlação de turbilhões. Outros são denominados indiretos e utilizam relações entre a evapotranspiração da cultura e um valor de referência (Allen et al., 1998).

Allen et al. (1998) definiram evapotranspiração de referência (ET_o) como sendo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, com albedo igual a 0,23, e resistência da superfície ao transporte de vapor de água igual a 0,70 s m⁻¹. Assemelha-se a um gramado, em crescimento ativo, que possui índice de área foliar (IAF) ao redor de 3 m² de área foliar por m² de terreno ocupado, sombreando totalmente um solo bem suprido de umidade e de nutrientes.

A ET_o pode ser estimada utilizando-se evaporímetros como Tanque Classe A, ou modelos matemáticos baseados em dados climáticos. Como exemplo, os modelos mais utilizados são o método padrão Penman-Monteith, o método Hargreaves-Samani e a Equação de Blaney-Criddle. Mantovani et al. (2007) afirmam que os modelos mais simples, e mais acessíveis, normalmente apresentam maiores desvios em relação ao método padrão (Penman-Monteith).

Desta forma, a ET_c pode ser estimada também pelo produto da ET_o pelo coeficiente da cultura (K_c), conforme Equação 1.

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (1)$$

Os coeficientes de cultura dependem do estágio de desenvolvimento da cultura, da frequência de irrigação, da configuração de plantio e das condições meteorológicas locais (Allen et al., 1998), determinados pelo uso da Equação 2.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (2)$$

O conhecimento da evapotranspiração da cultura e do coeficiente de cultivo é fundamental para se outorgar, dimensionar e manejar a irrigação de uma cultura e, uma vez que estes valores variam conforme a disponibilidade energética do local, tipo de solo, variedade e idade da planta são importantes à obtenção de valores regionalizados (Silva et al., 2006).

2.2 Razão de Bowen

A lei de conservação de energia afirma que os ganhos e perdas de energia em uma superfície estão em equilíbrio, de acordo com a Equação 3 (Santos 2009). De acordo com Pereira (2009), da energia que chega à superfície terrestre, de modo simplificado, uma parcela é utilizada para aquecer o ambiente na forma de fluxo de calor sensível (H), outra, no processo de evapotranspiração na forma de fluxo de calor latente (LE), e a outra parcela para aquecer o solo na forma de fluxo de calor no solo (G).

$$R_n \cong LE + G + H \quad (3)$$

Em que R_n é o saldo de radiação em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; LE é o fluxo de calor latente de evaporação, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; G é o fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; e H é o fluxo de calor sensível no ar, $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Durante o período diurno os valores de H, LE e G são, em geral, positivos considerados drenos de energia. Em circunstâncias muito especiais, como campos irrigados, H e/ou G assumem valores negativos, considerados fontes de energia, enquanto LE pode exceder o saldo de radiação à superfície, devido ao resfriamento evaporativo da mesma (Santos 2009). Durante a noite, os termos do balanço de energia são usualmente negativos. As magnitudes dos fluxos de calor latente e sensível são muito menores no período noturno, enquanto os valores de G não diferem muito entre o dia e a noite, apesar de haver uma inversão na direção do fluxo.

Kjaersgaard et al. (2007) afirmaram que as magnitudes dos componentes do balanço de energia dependem de muitos fatores tais como tipo de superfície e suas características, como umidade do solo, textura, vegetação, localização geográfica, estação do ano, hora do dia e clima. Em superfícies vegetadas, a evapotranspiração, modulada pelo fluxo de calor latente, é normalmente o processo que mais demanda energia. Em alguns casos consome 100% de R_n .

Entre os métodos micrometeorológicos de medição do balanço de energia, destaca-se o método baseado na razão de Bowen (β) (Equação 4), que é um método comumente usado na estimativa da evapotranspiração (Esteves et al., 2014) e tem sido amplamente empregado em uma grande variedade de condições

de campo (Zhang et al., 2008). Santos (2009) afirma que a determinação do balanço de energia com o método da razão de Bowen é utilizado para a quantificação dos fluxos de calor latente e sensível na camada de ar próxima à superfície do solo, particularmente em análises em sistemas cultivados. De acordo com Biudes et al. (2009), o método é muito usado para estimar a evapotranspiração de superfícies vegetadas, pois baseia-se na diferença entre a energia que entra e que sai de um sistema ou a energia captada por ele.

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\rho C_p K_h \frac{\partial T}{\partial z}}{\frac{\rho C_p}{\gamma} K_w \frac{\partial e}{\partial z}} = \gamma \frac{\partial T}{\partial e} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (4)$$

Em que ρ é a densidade do ar ($1,15 \text{ Kg m}^{-3}$); C_p representa o calor específico do ar à pressão constante; K_h e K_w são, respectivamente, os coeficientes de transporte turbulento de calor sensível e latente (considerados iguais de acordo com a teoria da similaridade); γ é um parâmetro psicrométrico; $\frac{\partial T}{\partial z}^{-1}$ é o gradiente vertical de temperatura ($^{\circ}\text{C m}^{-1}$); $\frac{\partial e}{\partial z}^{-1}$ é o gradiente vertical de pressão de vapor (hPa m^{-1}); ΔT é a diferença da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); Δe é a diferença de pressão de vapor (kPa).

Combinando-se as equações 3 e 4 o fluxo de calor latente é, então, dado pela Equação 5.

$$LE = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad (5)$$

Verifica-se uma indeterminação matemática à medida que β se aproxima de -1. De acordo com Cardoso et al., 2005, a obtenção de bons resultados com a razão de Bowen requer gradientes de temperatura e, principalmente, de vapor d'água, tais condições, normalmente, são obtidas em áreas úmidas sob ventos com velocidades maiores do que $2,0 \text{ m.s}^{-1}$. Nestes casos, o valor da razão de Bowen tende a se aproximar de zero (Viana, 2001).

A Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície vegetal foi ilustrada por Silva et al. (2007), Figura 1.

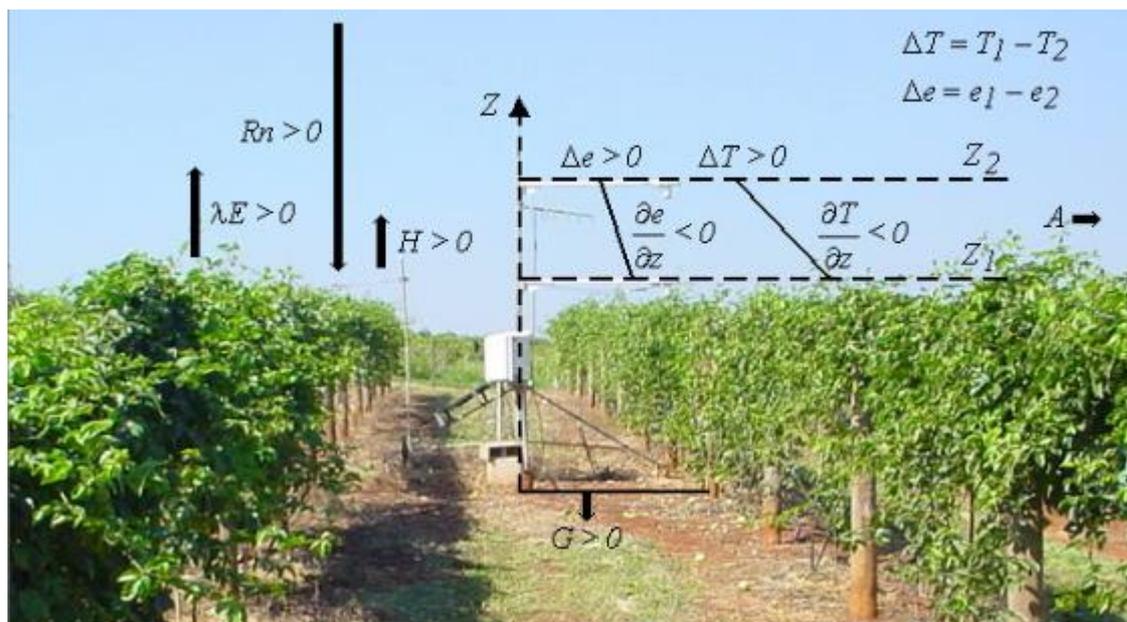


Figura 1. Representação dos fluxos de energia na interface entre o ar e a superfície vegetal, mostrando a convenção de sinais. A- fluxo de energia advectiva para o volume de controle acima da superfície; R_n -saldo de radiação; λE (LE) e H - fluxos de calor latente e sensível; G - fluxo de calor no solo; Δe e ΔT - diferença de pressão de vapor e temperatura entre os níveis inferior (Z_1) e superior (Z_2), e $\partial e/\partial z$ e $\partial T/\partial z$ - gradientes de pressão de vapor e temperatura. Silva et al. (2007).

Em muitos trabalhos em que o método de Razão de Bowen é utilizado, para evitar erros na estimativa dos fluxos, os dados inerentes ao erro instrumental micrometeorológico do sistema Razão de Bowen são excluídos (Silva et al., 2007). Um exemplo é o caso de os intervalos de valores dos gradientes de H , ΔT e pressão de vapor serem menores do que as resoluções dos sensores. Por outro lado, para casos em que os valores de β estão próximo de -1, alguns autores eliminam os valores de β abaixo de -0,75 ou valores entre $-1,3 < \beta < -0,7$.

Perez et al. (1999) ressaltaram que sob baixos gradientes de vapor de água, originários de baixa velocidade do vento ou de déficit hídrico no solo, a razão de Bowen tende a valores elevados inviabilizando a metodologia. Observando isso Perez et al. (1999) propuseram a exclusão de dados inconsistentes de β , e classificaram as classes de erros gerados pelo método de razão de Bowen, Tabela 1.

Tabela 1 Resumo das classes de erros gerados pelo método do balanço de energia razão de Bowen (Perez et al., 1999). Em que ε é o intervalo de erro que define o intervalo de valores de exclusão na razão de Bowen

Classe de erro	Condição
A	$(Rn-G) > 0, \Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \varepsilon $
B	$(Rn-G) > 0, \Delta e < 0$ e $\beta > -1 + \varepsilon $
C	$(Rn-G) < 0, \Delta e > 0$ e $\beta > -1 + \varepsilon $
D	$(Rn-G) < 0, \Delta e < 0$ e $\beta < -1 + \varepsilon $
E	Mudanças rápidas na temperatura e pressão de vapor

Esteves et al. (2014) em estudo para determinar o coeficiente de cultivo (k_c) da cultura de cana-de-açúcar utilizando a razão de Bowen, desconsideraram todos os valores de $\beta < -0,75$, e tiveram um aproveitamento de 62% de todos os dados medidos. Esse aproveitamento foi semelhante ao encontrado por Silva et al. (2011), 62,7%, também em estudo de cana-de-açúcar.

A utilização de critério de análise e a exclusão de intervalos não consistente pela razão de Bowen, melhora a qualidade dos dados, possibilitando a utilização dos mesmos para diferenciação da evapotranspiração da cultura (ET_c) em determinado ciclo (Silva et al., 2007), Equação 6.

$$ETC = \frac{LE}{\lambda} \quad (6)$$

Em que λ é o calor latente de vaporização da água.

Silva et al. (2005), trabalhando com capim-Tanzânia compararam os valores de ET_c obtidos pelos métodos de razão de Bowen e por lisímetros (método padrão), e constataram que os valores encontrados na razão de Bowen foram influenciados pela ausência de gradiente de temperatura e umidade em períodos chuvosos e, também, pela contribuição advectiva, provinda de áreas secas não-irrigadas circunvizinhas à área irrigada, para períodos secos, principalmente em regiões de clima seco e com ventos fortes. Apesar desses fatores, afirmaram que a utilização da razão de Bowen apresentou desempenho satisfatório na estimativa

de ETc. Os autores afirmaram também que a estimativa de ETc utilizando a razão de Bowen apresenta melhores resultados em períodos secos.

Silva et al. (2007) trabalhando com maracujazeiros observaram que a utilização do modelo de análise e exclusão de intervalos em que o método da Razão de Bowen falha, melhora a qualidade dos dados, permitindo verificar diferenciação na evapotranspiração da cultura entre os períodos de verão e de inverno.

2.2.1 Psicômetros

Para a aplicação da Razão de Bowen utiliza-se um conjunto de psicômetros. O psicômetro é um equipamento baseado na consideração de que o ar é uma mistura de muitos gases diferentes (ar seco) e vapor de água. A psicometria envolve as propriedades termodinâmicas das misturas do ar úmido e as utiliza para analisar condições e processos, levando em consideração a relação dos gases ideais (ASHRE, 2001; Wilhelm et al., 2004)

Na psicometria se utilizam as leituras de dois termômetros, sendo um de bulbo seco e outro de bulbo úmido. O bulbo seco é a medida da temperatura do ar e o bulbo úmido mede a evaporação potencial, sendo realizada por um termômetro em contato com uma mecha de algodão saturada com água, o que reduz a sua temperatura em relação ao ar (Silva et al. 2011). A água evaporada cria um efeito de resfriamento, logo a temperatura do bulbo úmido será menor que, ou no máximo igual, a temperatura ambiente. A taxa de evaporação diminui à medida que o teor de umidade do ar aumenta (Wilhelm et al., 2004). Logo, o bulbo úmido apresenta uma relação direta com a umidade relativa, e, por isso a psicometria é muito utilizada para determinação de umidade atmosférica.

As equações psicométricas apresentadas por ASHRE (2001), são demonstradas a seguir, Equações 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

$$\ln(P_{vs}) = \frac{-5800,2206}{T} + 1,3914993 - 0,0486402390T + 4,1764768 \times 10^{-5} \quad (7)$$

$$T^2 - 1,4452093 \times 10^{-8} T^3 + 6.5459673 \ln(T)$$

$$W_{s (bs \text{ ou } bu)} = 0,62198 \frac{P_{vs(vsbs \text{ ou } vsbu)}}{P - P_{vs(vsbs \text{ ou } vsbu)}} \quad (8)$$

$$W = \frac{[2501-2,381(T_{bs}-273,16)]W_{sbu}-[1,00675(T_{bs}-T_{bu})]}{2501+1,805(T_{bs}-273,16) - 4,186(T_{bu}-273,16)} \quad (9)$$

$$P_v = \frac{PW}{0,62198+W} \quad (10)$$

$$v = \frac{R_a T}{P} (1+1,6078 W) \quad (11)$$

$$\mu = \frac{W}{W_{sbs}} \quad (12)$$

$$\Phi = \left[\frac{m_v}{m_{vs}} \right]_T = \left[\frac{P_v}{P_{vs}} \right]_T \quad (13)$$

$$h = 1,006 t + W(2501+1,775t) \quad (14)$$

$$T_{po} = 6,983+14,38a+1,079 a^2 \quad (15)$$

Em que P_{vs} é a pressão de vapor na condição de saturação em kPa, sendo que P_{vsbs} e P_{vsbu} são bulbo seco e úmido, respectivamente; T é a temperatura em K, em que T_{bs} e T_{bu} são bulbo seco e úmido, respectivamente; W_s é a razão da mistura em $\text{kg}_v \text{ kg}_{(ar \text{ seco})}^{-1}$, sendo que W_{sbs} e W_{sbu} são bulbo seco e úmido, respectivamente; P é a pressão atmosférica local em kPa; R_a é a constante universal do gases perfeitos em $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; P_v é a pressão de vapor em kPa; V é o volume específico em $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$; μ é o grau de saturação em %; Φ é a umidade relativa; h é a entalpia em kJ kg^{-1} ; t é a temperatura de bulbo seco em $^{\circ}\text{C}$; T_{po} é a temperatura do ponto de orvalho em $^{\circ}\text{C}$; e $a = \ln(P_v)$.

2.3 Eddy covariance

A eddy covariance (EC) é uma metodologia que observa deslocamento dos turbilhões de ar próximo à cultura, fazendo estimativas dos fluxos de CO₂, de calor sensível, de calor latente (vapor d'água), baseando-se na correlação entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com os desvios temporais do escalar (Santos 2009). A densidade média de fluxo, de um escalar em um período de tempo, geralmente 30 min, é expressa como a covariância entre as flutuações na velocidade vertical do vento (w) e a concentração escalar ou relação de mistura.

De acordo com Rosa (2012), o método EC requer algumas condições a serem cumpridas, uma vez que a medição é baseada no pressuposto de uma camada de fluxo constante (isto é, o fluxo emanando ou absorvido no dossel é o mesmo que o medido vários metros acima). Os sensores EC devem ser instalados dentro de uma camada limite de superfície turbulenta totalmente desenvolvida em um terreno homogêneo plano, que apresenta um perfil de vento logarítmico sob condições de estabilidade. Desse modo, são evitadas as condições de advecção e a divergência de fluxo horizontal associada. Para satisfazer as exigências acima, o campo em estudo deve ser suficientemente grande, proporcionando uma recuperação suficiente para o desenvolvimento das condições de turbulência requeridas. Devido à densidade co-espectral (isto é, quantidade de fluxo associada a uma determinada frequência) que cada covariância apresenta, é necessário aplicar taxa de amostragem relativamente elevada. Verificou-se que uma frequência de amostragem de 10 Hz era suficiente para a porção de alta frequência do co-espectro de fluxo (Baldocchi, 2003; Arruda et al., 2006).

Cada turbilhão tem características específicas, e ao se medir estas características e a velocidade vertical do vento, em um determinado intervalo de tempo, torna-se possível determinar os fluxos de entrada e saída de gases, concentração de vapor d'água, a temperatura e umidade em cada turbilhão (Burba et al., 2013).

Os turbilhões mais úmidos e mais aquecidos gerados próximos à superfície são deslocados verticalmente para cima, e substituídos por turbilhões menos aquecidos (Escobar, 2008).

Em um primeiro momento o turbilhão passa pelo sensor (velocidade do vento vertical para baixo), que quantifica a velocidade vertical do vento (ω_1) e a concentração do gás (s_1), em um segundo momento, uma nova passagem do turbilhão pelo sensor (velocidade do vento vertical para cima), em que novamente são quantificadas a velocidade vertical do vento (ω_2) e a concentração do gás (s_2) (Alves, 2015).

De acordo com Rosenberg et al. (1983), a densidade do fluxo médio vertical (F) de uma variável (s) pode ser dada pela Equação 16.

$$F = \rho_{ar} \cdot \omega \cdot s \quad (16)$$

Em que ω é o componente vertical da velocidade do vento, ρ_{ar} é a densidade (ou concentração) do ar.

Para um determinado intervalo de tempo, a densidade de fluxo médio pode ser descrita pela Equação 17.

$$F = \rho_{ar} \cdot \overline{\omega \cdot s} \quad (17)$$

Em que $\overline{\omega \cdot s}$ é a média do produto $\omega \cdot s$. Ou seja, o produto $\omega \cdot s$ deve ser obtido a cada instante e só depois é calculado o valor médio do produto.

Devido à grande quantidade de flutuações observadas nas medidas de velocidade do vento, temperatura e concentração de CO_2 , nos estudos de turbulência atmosférica é comum decompor essas variáveis em um componente médio e outro turbulento (Alves, 2015), conforme Equação 18.

$$F = \rho_{ar} \cdot \overline{\omega \cdot s} + \rho_{ar} \cdot \omega' \cdot s' \quad (18)$$

Em que $\omega' \cdot s'$ correspondem aos componentes turbulentos das variáveis.

No entanto, o valor médio de ω é considerado nulo, visto que a massa de ar ascendente se iguala à massa de ar descendente ao final de um período. Por convenção, o valor da flutuação de ω (ω') é positivo no caso de movimento ascendente, e negativo em caso contrário (Santos, 2009). Logo, se conclui que o fluxo médio da propriedade “F” é dado pela Equação 19.

$$F = \rho_{\text{ar}} \cdot \overline{\omega' \cdot s'} \quad (39)$$

De forma que a densidade média de fluxo turbulento é dada então pela média do produto das flutuações da velocidade vertical (ω') e da grandeza que está sendo transportada (s').

Os fluxos turbulentos de calor sensível e calor latente podem ser expressos, respectivamente, pelas Equações 20 e 21.

$$H = \rho_{\text{ar}} C_p \overline{\omega' \cdot T'} \quad (20)$$

$$LE = L_v C_p \overline{\omega' \cdot q'} \quad (21)$$

Em que, T' é o componente turbulento da temperatura do ar (K), q' é o componente turbulento da umidade específica do ar (kg kg^{-1}), C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$) e L_v é o calor latente de vaporização da água.

2.4 Método aerodinâmico

No método aerodinâmico o fluxo de momento é o mais importante a ser determinado, busca-se determiná-lo a partir das medidas da velocidade horizontal do vento (Alves, 2015). No entanto, se faz necessário que a atmosfera se encontre em condições de estabilidade (equilíbrio entre forças térmicas e mecânica, fazendo que a velocidade horizontal do vento seja aproximadamente igual à velocidade vertical do vento), podendo-se estabelecer uma relação para a velocidade característica do escoamento, a partir do perfil logaritmo do vento.

De acordo com Lima (2004), assumindo-se que uma densidade de fluxo pode ser relacionada ao gradiente da concentração na camada superficial atmosférica, o fluxo de calor latente (LE) pode ser determinado diretamente por meio dos fatores de escalonamento u^* e q^* , sendo q^* a umidade específica do ar (kg kg^{-1}), dado pela Equação 22:

$$LE = -L \rho u^* q^* \quad (22)$$

Em que L é o calor latente de vaporização ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$); ρ a densidade do ar (kg m^{-3}) e a velocidade de fricção u^* (m s^{-1}) sendo derivada das medições do perfil de vento, Equação 23.

$$u^* = \frac{k u}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \Psi_m} \quad (23)$$

Em que k (0,41) a constante de von Karman; d (m) a altura de deslocamento do plano zero; z_0 (m) o comprimento de rugosidade da superfície e Ψ_m a função de correção de estabilidade para transporte de momentum.

O q^* é determinado similarmente das medições do perfil de umidade, Equação 24:

$$q^* = \frac{k(q - q_0)}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \Psi_v} \quad (24)$$

Em que q_0 a umidade do ar extrapolada para $z = d + z_0$ e Ψ_v a função de correção para transporte de calor latente.

A principal dificuldade deste método é a correta medição da pressão de vapor em diferentes alturas acima da cultura (Alves, 2015). Rana e Katerji (2000) afirmam que a acurácia do método depende do número de níveis de medição dos perfis de velocidade do vento e de temperatura do ar.

2.5 Surface renewal analysis

A primeira teoria da Surface Renewal (SR) foi desenvolvida por Higbie em 1935 para investigar a transferência de calor entre um líquido e um gás (Rosa, 2012). De acordo com a autora, Higbie baseou-se no conceito de um novo elemento fluido que chega de uma região externa a uma superfície dada, tendo um tempo de residência que permite um intercâmbio escalar difusivo e a eventual substituição (ou seja, renovação) desta massa de fluido por outro elemento fresco a partir do lado de fora. Esta teoria foi posteriormente adaptada para o movimento do turbilhão.

A técnica da SR estima o fluxo de calor sensível (H) a partir de medições de alta frequência da temperatura do ar, sendo que a duração do contato entre o

fluido que chega e a superfície aquecida, o dossel da cultura, e a frequência de renovação são variáveis (Rosa, 2012).

O primeiro esquema de SR aplicado às copas foi proposto por Paw U e Brunet (1991) combinando o raciocínio de Higbie com os padrões de rampa observados de sinais de temperatura de alta frequência observados sobre um dossel. A SR é baseada na observação de que as parcelas de ar perto da copa são continuamente trocadas com novas que descem a partir da atmosfera acima. Para explicar o SR, Castellvi (2012) considera uma parcela de ar (A) e seu movimento para dentro e fora da superfície da copa. Esta parcela (A) tem alguma concentração escalar, por exemplo, temperatura, e movimenta-se acima da copa. Em determinado momento a parcela A desloca-se para baixo (Figura 2.a) aproximando-se da camada superior do dossel (uma varredura) que está ligada a fontes escalares da superfície, (vegetação), durante certo período de tempo (Figura 2.b). Esta parcela A é subsequentemente ejetada para cima (uma ejeção) e substituída por outra parcela B que move-se acima (Figura 2.c). Durante o tempo em que a parcela A estava em contato com a copa, os escalares foram trocados entre o ar e a copa da planta, portanto, quando a parcela A é ejetada, ela foi enriquecida ou esgotada com a troca escalar.

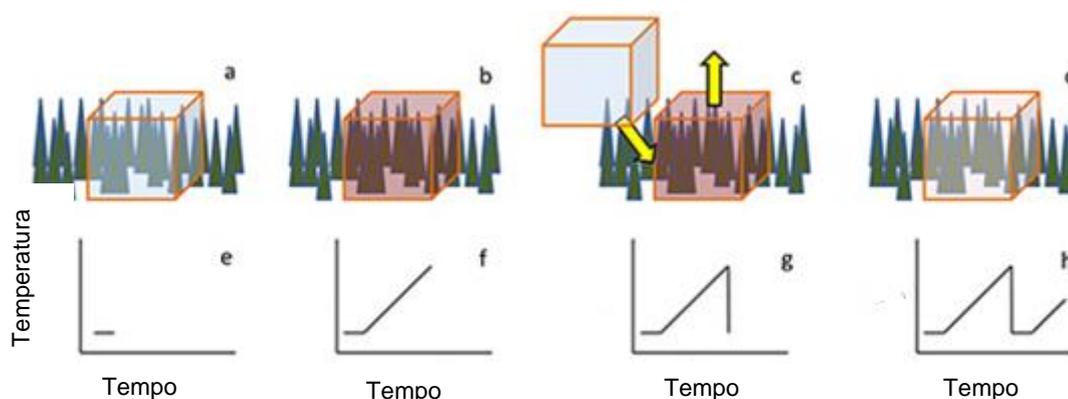


Figura 2. Comportamento das parcelas de ar próximas ao dossel cultura. Fonte: McElrone et al., (2013)

Paw U et al. (1995) justificaram a necessidade de um método escalar (isto é, sem usar sinais de velocidade de vento de alta frequência) para estimar H considerando-se as limitações que os outros métodos citados apresentam (baixos ventos ou requisitos de busca) e o custo dos dispositivos de medição e instalação geral. O aumento da temperatura para cada pacote de ar durante o seu tempo de

residência próximo (ou dentro) do dossel permite uma estimativa do fluxo de calor sensível (H) da superfície (até um fator de calibração).

Estimando o valor de H é possível encontrar indiretamente o fluxo de calor latente a partir da Equação do balanço de energia (Paw U e Brunet, 1991). Alguns autores aplicaram este método em pomares, tendo encontrado uma boa concordância com os resultados obtidos por outros métodos. Villalobos (1996) utilizou-o em pomar de oliva, tendo encontrado um elevado coeficiente de correlação na comparação com resultados obtidos por um método de medição de fluxo de seiva embora a relação se afastasse da reta 1:1, indicando a necessidade de calibração de um ou de ambos os métodos. Spano et al. (2000) utilizando essa técnica, obtiveram resultados muito próximos dos medidos pelo método das flutuações instantâneas. Estes autores salientam a utilidade do método para a determinação da ET de cultivos esparsos e altos, não necessitando de calibração e apresentando custos relativamente baixos.

Quando medições de temperatura de alta frequência são tomadas em um ponto no topo da copa ou acima dela, observam-se rampas no sinal devido às flutuações serem criadas por redemoinhos de grande escala (Castellvi, 2004). Uma rampa é caracterizada por uma amplitude térmica A e a frequência de rampa inversa t. Quando as condições são de turbulência, o dossel é mais quente do que o ar. Após a varredura, o sinal de temperatura mostra uma queda acentuada devido à invasão de um pacote de ar mais frio vindo de camada superior. Isto é seguido por um período quiescente (isto é, sem alteração de temperatura) "s" (s) e então um período "L" (s) com aumento gradual de temperatura à medida que o pacote aéreo é aquecido pela vegetação ($L + s = t$). Este aquecimento é observado como amplitude de rampa de temperatura positiva "A" ($^{\circ}\text{C}$ ou K). Um esquema do mecanismo e a rampa ideal para condições instáveis é apresentado na Figura 3 elaborada por Paw U et al. (2009).

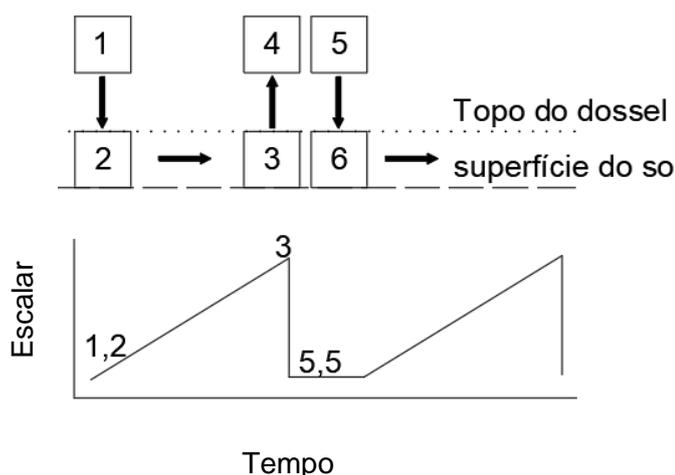


Figura 3. Esquema do mecanismo de rampa. Fonte: Paw U et al. (2009).

Observando o esquema proposto por Paw U et al. (2009), nota-se a mudança da parcela aérea “A” da posição 1 à posição 2 na copa (desenho superior). O escalar começa a aumentar na parcela devido a uma fonte no dossel, mostrada no gráfico escalar vs tempo (gráfico inferior). O escalar continuou a aumentar até um pico correspondente à posição 3, no gráfico escalar versus tempo (gráfico inferior). Depois de uma advecção entre o ar e o dossel, a parcela “A” instantaneamente aumenta da posição 3 para a posição 4. Simultaneamente, a partir da posição 5, uma nova parcela “B” substitui instantaneamente a parcela aérea antiga no dossel, mostrada como posição 6 (deslocada horizontalmente no desenho superior para maior clareza). Isto resulta em uma queda instantânea no valor escalar (gráfico inferior), terminando o aumento escalar gradual anterior e formando o padrão de rampa (Paw U et al., 2009).

Usando a teoria da função de estrutura (Atta, 1977) as características dessas rampas podem ser determinadas a partir da série temporal de temperatura de alta frequência, permitindo assim uma estimativa do fluxo de calor sensível, H ($W m^{-2}$), calculado como (Spano et al., 2000), Equação 25.

$$H_{SR} = \alpha H_{NC} = \alpha \rho C_p \frac{dT}{dt} z \approx \alpha \rho C_p \frac{A}{L+s} z \quad (25)$$

Em que: α é o factor de calibração (peso), H_{NC} ($W m^{-2}$) é o fluxo de calor sensível não calibrado, ρ ($kg m^{-3}$) é a densidade do ar, C_p ($J kg^{-1} K^{-1}$) é o calor específico do ar a pressão constante, T (K) é a temperatura do ar, t (s) é o tempo, $\frac{dT}{dt}$ contabilizada para a derivada total (ou seja, seguindo o movimento) da

temperatura do ar, A (K) e “ $L + s$ ” (s) são a amplitude da temperatura da rampa e duração da rampa, respectivamente, e z (m) é a altura da medição.

A técnica SR requer alta taxa de amostragem de sinais de temperatura do ar, a fim de capturar corretamente o movimento turbulento de ejeções e varreduras. Na literatura as amostragens são geralmente entre 8 e 10 Hz (Rosa, 2012).

O método clássico para aplicar a técnica SR é baseado na estimativa da rampa (“ a ” e “ t ”) aplicando a análise da Função de Estrutura (Atta, 1977) a um sinal de temperatura para um dado período de tempo médio (normalmente 30 min) (Rosa, 2012), Equações 26, 27, 28, 29 e 30.

$$S^n(r) = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \sum_{i=1}^{i=m-j} (T_{i+j} - T_i)^n \quad (26)$$

Em que, m é o número de pontos de dados; n é a ordem da função da estrutura; j é o retardo da amostra; i é o número do ponto de dados.

Dependendo da frequência de amostragem (f), o retardo da amostra corresponde a um intervalo de tempo (r) em segundos. Por exemplo, se $f = 8$ Hz e $j = 2$, então $r = 2/8 = 0,25$ s (Paw U et al., 2005).

Seguindo a abordagem de Van Atta (1977), as potências de segunda, terceira e quinta ordem de uma função de estrutura são usadas para estimar o valor médio de “ A ” durante o intervalo de tempo, determinado pela resolução das Equações 27, 28 e 29.

$$A^3 + p \cdot A + q = 0 \quad (27)$$

Onde:

$$p = 10 \cdot S^2(r) - \left(\frac{S^5(r)}{S^3(r)}\right) \quad (28)$$

$$q = 10 \cdot S^3(r) \quad (29)$$

Em seguida, a frequência inversa da rampa é calculada pela Equação 30.

$$\tau = L + s = - \frac{A^3 \cdot r}{S^3(r)} \quad (30)$$

Um exemplo para maior entendimento de como aplicar as equações de cálculo da rampa e amplitude é apresentado por Paw U et al. (2005):

“São escolhidos quatro tempos de retorno (r), 1,0 s (r_4); 0,75 s (r_3); 0,5 s (r_2); e 0,25 s (r_1), para as leituras de temperatura (T) em um termopar. Se T_4 , T_3 , T_2 e T_1 foram as leituras de temperatura tomadas em r_4 , r_3 , r_2 e r_1 e T_0 é a temperatura atual, então, antes de um novo dado ser coletado, T_4 é substituído por T_3 , T_3 é substituído por T_2 , T_2 é substituído por T_1 , T_1 é substituído pelo T_0 anterior, e um novo valor para T_0 é registrado. Então, usando os retornos de tempo $r = 0,5$ e $r = 1,0$ s como um exemplo, as diferenças $T_2 - T_0$ e $T_4 - T_0$, respectivamente, foram armazenadas temporariamente. O segundo, terceiro e quinto momentos das diferenças de temperatura são calculados e armazenados temporariamente. No final de um período de meia hora, as médias dos momentos 2, 3 e 5 são calculadas e armazenadas em uma tabela de saída. Com esses dados em mão é só aplicar as equações propostas.”

Uma vez que estas características são obtidas, o H_{NC} (uma estimativa não calibrada de H com o método SR) é calculado usando a Equação 25. Finalmente, as estimativas de meia hora de H_{NC} são regredidas linearmente com valores H de referência (por exemplo, medições EC - H_{EC}) e o coeficiente α é obtido como a inclinação dessa regressão linear (com ou sem interceptação), obtendo assim a calibração H_{SR} .

As regressões podem ser realizadas considerando todos os dados obtidos, ou seja, um valor α independente das condições de estabilidade (Spano et al., 1997), ou dividindo os dados em casos estáveis e instáveis, obtendo-se assim dois valores α (α_{est} e α_{ins}) (Paw U et al., 1995). Independente da abordagem escolhida, α será constante durante o período de calibração e deverá ser testado posteriormente durante um período de validação (Rosa, 2012). A validação pode ser feita tanto para H_{SR} estimado como para LE_{SR} (isto é, LE obtido com o método SR) com medidas de EC (Simmons et al., 2007), Lisimetria (Zapata e Martinez-Cob, 2002) ou outro método de estimativa.

Rosa (2012) afirma que o conhecimento sobre α é limitado, particularmente em condições estáveis, portanto, é difícil fornecer regras gerais sobre ele, como

variabilidade de seus valores médios ou calibrados, suas dependências da altura de medição, arquitetura do dossel, intervalos de tempo e frequência usados nas Funções de Estrutura e Aplicação e a sua dependência das condições de estabilidade (Castellvi, 2004).

Snyder et al. (2008) afirmaram que o valor de α depende do diâmetro do termopar, frequência de amostragem, altura de medição acima do solo e vegetação subjacente. Mengitsu e Savage (2010) reforçam esta afirmação, acrescentando que α aumenta com o tamanho do sensor de temperatura. Quanto ao tempo de calibração, segundo Snyder et al. (2008), α pode ser obtido e considerado inalterado após uma ou duas campanhas de 1 ou 2 semanas, durante uma estação, e permanece inalterado se a arquitetura da vegetação, a altura da medição e os sensores de temperatura forem constantes.

O objetivo principal da aplicação da técnica SR é obter a estimativa de LE_{SR} para quantificar ET_c sobre um suporte agrícola. Esta estimativa é realizada calculando-se LE_{SR} como o resíduo da Equação EB (Equação 3) usando H_{SR} (Spano et al., 2000). Assim, um método barato, simples e em tempo real para estimativa ET pode ser obtido. Spano et al. (2000) obtiveram valores de LE_{SR} que diferiram menos de 12% das estimativas LE obtidas como o resíduo da Equação EB usando H_{EC} em um dossel de uva. Simmons et al. (2007) compararam as estimativas de LE_{SR} com as medições LE_{EC} da cultura de noz e obtiveram um erro médio de 10% usando uma regressão linear forçada através da origem.

3. TRABALHOS

3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA ESTIMATIVA DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL UTILIZANDO COMPONENTES DE BAIXO CUSTO

RESUMO

Objetivou-se com essa pesquisa desenvolver um sistema de aquisição de dados de baixo custo para estimar o fluxo de calor sensível utilizando as metodologias de surface renewal e eddy covariance, analisando seu desempenho das leituras com o desempenho de um equipamento comercial. O sistema foi desenvolvido utilizando componentes de baixo custo em laboratório, em Campos dos Goytacazes, RJ, sendo testado sobre cultivo de feijão em uma área lisimétrica e sobre um cultivo de lima ácida 'Tahiti' em uma área monitorada por uma estação comercial de eddy covariance, ambas no norte de Minas Gerais. Para estimativa do calor sensível utilizando o método do surface renewal, foram determinados valores de α igual a 0,6023 quando comparado com lisímetros, e na comparação com a eddy covariance comercial foram determinados valores de α de 1,1219 para intervalos de 30 min e α de 1,012 para valores diários. O sistema, aplicando o método da eddy covariance, obteve um α de 0,8863. O sistema de aquisição de dados apresentou resultados satisfatórios para a estimativa do calor sensível utilizando a metodologia de surface renewal. E, para leituras utilizando o método de eddy covariance, o sistema teve a eficiência prejudicada devido às limitações do modelo de anemômetro utilizado.

Palavras-chave: surface renewal, eddy covariance, evapotranspiração da cultura, lisímetro.

DATA ACQUISITION SYSTEM FOR SENSITIVE HEAT FLOW ESTIMATION USING LOW COST COMPONENT

ABSTRACT

This study was carried out in order to develop a low-cost data acquisition system to estimate sensible heat flow using surface renewal and eddy covariance theory, analyzing its performance with the commercial equipment performance. The system was developed using low cost components in a laboratory located in Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil, and was tested on bean cultivation in a lysimetric area and on a 'Tahiti' lime cultivation in an area monitored by a commercial eddy covariance station, both in the north of Minas Gerais, Brazil. It was found α values of 0.6023 when compared to lysimeters. When comparison with commercial eddy covariance α values of 1.1219 for every 30 minutes and α of 1.012 for daily values were found. The system, applying the eddy covariance method, obtained an α of 0.8863. The data acquisition system presented satisfactory results for the estimation of sensible heat flux using the surface renewal method. And for readings using the eddy covariance method, the system was impaired due to the limitations of the anemometer model used.

Keyword: surface renewal, eddy covariance, crop evapotranspiration, lysimeter.

INTRODUÇÃO

A estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) é fundamental para o correto manejo da irrigação, podendo ser medida via solo, planta e atmosfera (Castellví e Snyder, 2010; Moratíel e Martínez-Cob, 2013; Rosa e Tanny, 2015).

Na medição via atmosfera, destaca-se como um dos mais precisos, o método de eddy covariance (EC), tendo como princípio a leitura em alta frequência da variação escalar de variáveis atmosféricas provocada pelos turbilhões de ar (Aubinet et al., 2012).

A técnica de EC é muito utilizada em pesquisas, sendo inexpressivo o seu uso por agricultores devido à complexidade de operação, à exigência de análise massiva de dados e, principalmente, ao alto custo do equipamento (Castellví e Snyder, 2010; Haymann et al., 2019).

A técnica do surface renewal (SR) é uma alternativa econômica ao método EC (Castellví e Snyder, 2010). Baseada na estimativa do fluxo de calor sensível (H) a partir de medições de alta frequência da temperatura do ar, a SR analisa a renovação do fluido de ar que chega na superfície ou no dossel da planta (Paw e Brunet, 1991). A duração e a frequência de renovação são variáveis para diferentes culturas (Rosa e Tanny, 2015).

A eficiência da metodologia de SR para estimativa do H e consequentemente da ET_c destaca-se como um método de instrumentação mais simplificado e de menor custo (Zapata e Martínez-Cob, 2002; Castellví e Snyder, 2010; Moratiel e Martínez-Cob, 2013; Savage, 2017; Haymann et al., 2019).

Desse modo, objetivou-se com este trabalho desenvolver um protótipo de um sistema de aquisição de dados, utilizando componentes de baixo custo, capaz de aplicar as técnicas de surface renewal e eddy covariance para medições de calor sensível (H), e confrontar o desempenho deste protótipo com o de equipamentos comerciais.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), localizado no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ. A análise de desempenho do protótipo sistema de aquisição de dados foi realizada em duas diferentes fases, a primeira em uma área experimental lisimétrica e a segunda em uma fazenda produtiva que contém uma estação de eddy covariance.

O sistema de aquisição de dados foi desenvolvido utilizando a plataforma de prototipagem do Arduino, caracterizada por ser de código aberto e que utiliza hardware e software para interagir com o ambiente externo (Silva et al., 2015), com objetivo de permitir a aplicação dos métodos de EC e SR, simultaneamente, para a estimativa do fluxo do calor sensível (H).

Para a construção do sistema utilizou-se uma placa de desenvolvimento modelo STM32F103C8T6, um módulo de Micro SD para gravação de dados, dois módulos para leitura de termopar modelo MAX31856, termopares de fio 76,2 μm , um anemômetro vertical de hélice Gill (R. M. Young), um módulo temporizador modelo RTC DS-3231, dois módulos reguladores de tensão de 3 V e 5 v, um módulo de controle de continuidade modelo watchdog, um módulo display LCD, um módulo conversor analógico digital ADS 1115, conectores, resistores, jumps, uma placa fotovoltaica, um controlador de carga, painel solar automático de 10 A e 12 v, uma bateria de 7 A, tubos e conexões de PVC para o suporte do termopar e uma caixa de abrigo para os sensores, o esquema elétrico é apresentado na Figura 1.

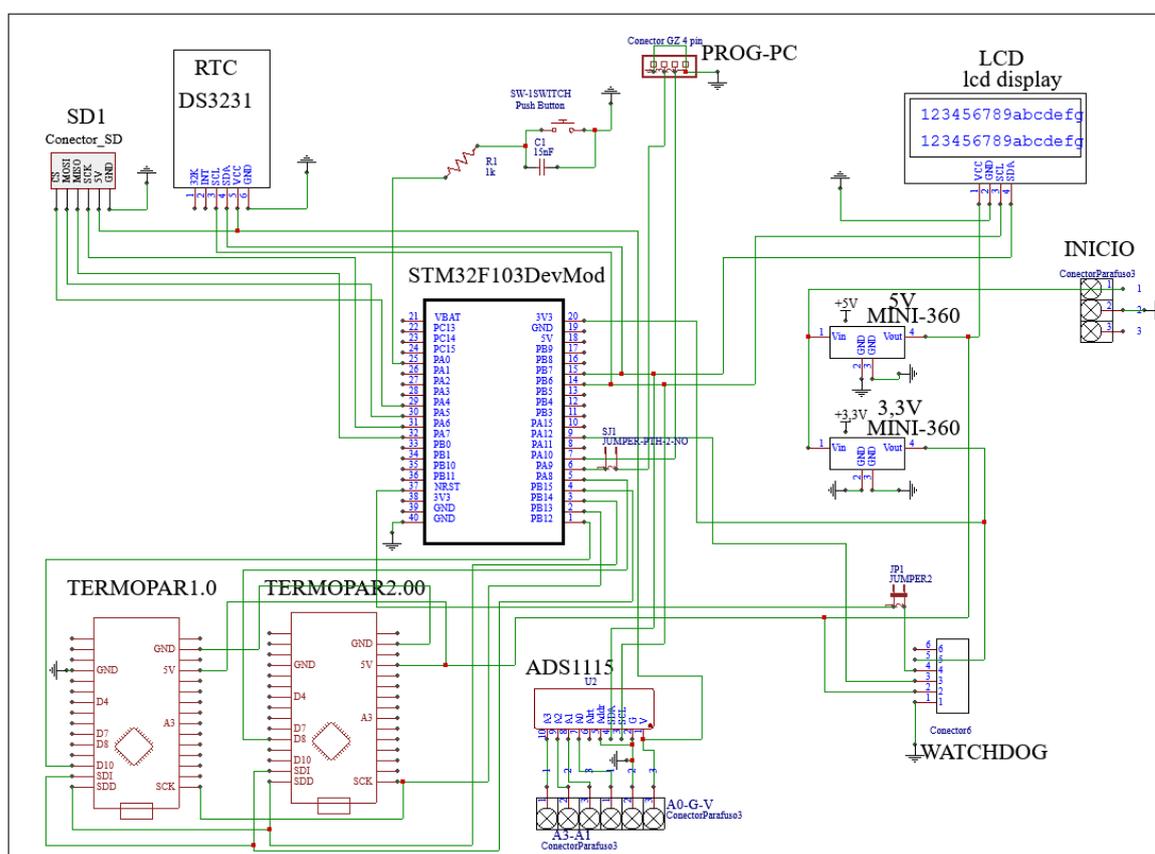


Figura 1. Esquema elétrico completo da placa desenvolvida.

O algoritmo de programação utilizado foi o software aberto Arduino IDE™, que é baseado em linguagem C/C++ (Jordão et al., 2017), sendo programado para realizar leituras dos dois termopares e do anemômetro vertical com uma frequência de 4 Hz, que está dentro do limite, 1 Hz a 10 Hz, recomendado para a técnica do SR (Hu et al., 2018). Os dados eram armazenados em tempo real em um cartão

SD de 16 Gb, gerando um arquivo de texto para cada hora do dia. Caso ocorresse problemas com a leitura em período superior a 10 s, o módulo watchdog resetava o sistema. O fluxograma da programação é representado na Figura 2.

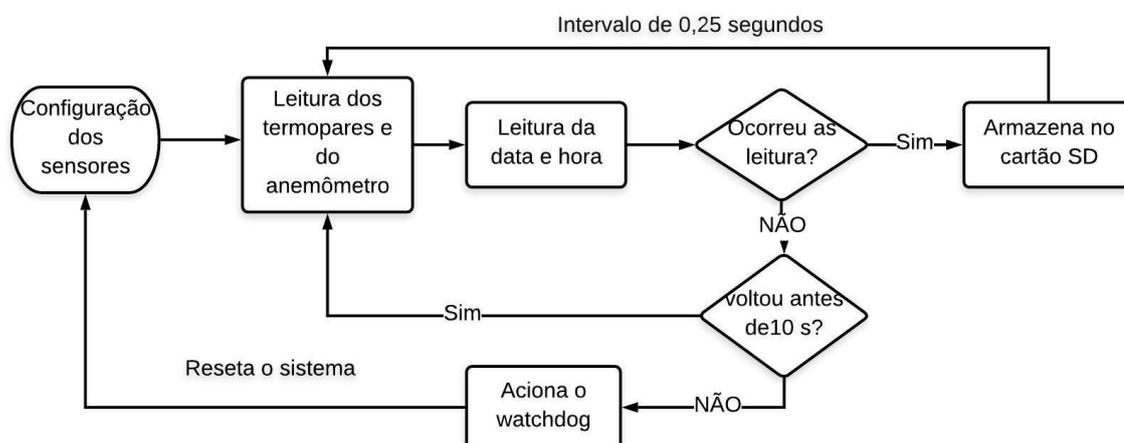


Figura 2. Fluxograma de automação do sistema.

Os termopares foram instalados a uma distância verticalmente de 40 cm entre eles, sendo que o termopar superior ficava próximo à hélice do anemômetro. Desse modo, o termopar superior e o anemômetro eram utilizados para estimativa da EC, e o SR era estimado pelos dois termopares. Os termopares eram protegidos pelo tubo de PVC de 25 mm, sendo que somente uma ponta de 1 mm foi exposta ao vento na extremidade aberta do “joelho” de PVC. Ao todo foram investidos, aproximadamente, R\$ 2000,00 na compra de todos os componentes do sistema.

Na primeira fase, o sistema foi instalado sobre um cultivo de feijão carioca, *Phaseolus vulgaris L.*, durante o estágio inicial até os 30 dias após a emergência das plantas, em uma área de 220 m². As leituras foram realizadas na área experimental lisimétrica do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, Montes Claros – MG, no período de 1 a 15 de outubro de 2018. O clima da região é do tipo Aw clima tropical de savana com inverno seco e verão chuvoso, também classificado como semiárido, segundo a classificação de Köppen (Barbosa et al., 2015). O tipo de solo na área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, de textura argilosa (Lopes et al., 2011)

Essa área é composta por 21 lisímetros de drenagem, cada um com o volume de 1 m³, e uma estação meteorológica. O feijão foi plantado com uma

densidade de 28 plantas por m², não houve variação de lâmina na área e a irrigação era feita por gotejamento fora dos lisímetros e com uma mangueira adaptada com um hidrômetro dentro dos lisímetros.

O sistema foi posicionado no centro da área, e adotaram-se os seis lisímetros que a contornavam como referência. A evapotranspiração de referência (ET_o), utilizada para determinar a lâmina, foi estimada utilizando os dados da estação meteorológica local e a metodologia de Penman-Monteith parametrizada pela FAO (Allen et al., 1998). A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada conforme Barbosa et al. (2015), sendo adotado o ET_c médio entre os seis lisímetros.

Na segunda fase, o sistema foi posicionado junto a uma estação de eddy covariance comercial sobre um cultivo de lima ácida Tahiti, *citrus latifolia* (Yu. Tanaka) Tanaka cv. IAC 5, plantado na Fazenda Saara, situada no projeto Jaíba, Latitude 15° 03'35,4" e Longitude 43° 47' 52,7", no período de 18 de outubro a 29 de novembro de 2018. O clima da região também é do tipo Aw, segundo a classificação Köppen (Silva et al., 2018).

A lima ácida Tahiti foi plantada em agosto de 2010 com o espaçamento de 7 m x 5 m em uma área total de 35,78 ha, irrigado por gotejamento. A estação de eddy covariance posicionada sobre o dossel da cultura é composta com um anemômetro sônico tridimensional modelo CSAT3, Campbell Scientific, um analisador de CO₂/H₂O infravermelho de caminho aberto modelo LI-7500, LICOR Biosciences, um saldo radiômetro modelo NR-Lite, sensores de temperatura e umidade relativa modelo HMP155A-L. As leituras foram realizadas a uma taxa de 10 Hz e armazenadas no datalogger CR1000, Campbell Scientific.

Na área dos lisímetros, o primeiro termopar foi instalado a uma altura de 1,20 m e o segundo a 1,60 m da cultura. Na área da lima ácida Tahiti o primeiro termopar ficou a 0,40 m e o segundo a 0,80 m acima do dossel da cultura.

A coleta dos dados armazenados foi realizada, periodicamente, retirando o cartão de SD e descarregando os dados em um computador. Para que o equipamento não ficasse desligado, utilizaram-se dois cartões SD, onde ao retirar um cartão para coletar os dados o outro era colocado em seu lugar imediatamente.

Para o processamento dos dados coletados, foi utilizado o software Excel e suas ferramentas em Visual Basic for Applications, gerando uma planilha para cada dia.

Para estimativa de calor sensível utilizando o método EC, foi utilizada a Equação 1, de acordo com Echeverría et al. 2014.

$$HEC = \rho_{ar} C_p \overline{\omega' \cdot T'} \quad (1)$$

Em que, HEC é calor sensível utilizando o método de EC ($W m^{-2}$), T' é o componente turbulento da temperatura do ar ($^{\circ}C$), ω' e componente turbulento das flutuações do vento vertical ($m s^{-1}$), C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($J kg^{-1}^{\circ}C^{-1}$), ρ_{ar} é a densidade do ar ($kg m^{-3}$), sendo esses dois últimos considerados valores constantes.

A média dos produtos entre a velocidade vertical do vento e a temperatura do ar para um período de 30 min, foi encontrada pela diferença entre cada valor e a média do período, de acordo com a Equação 2.

$$\overline{\omega' \cdot T'} = \frac{1}{m} \sum_i^m (\omega_i - \bar{\omega})(T_i - \bar{T}) \quad (2)$$

Em que $\overline{\omega' \cdot T'}$ é a média dos produtos entre a velocidade vertical do vento e a temperatura do ar.

Para estimava do calor sensível utilizando o método SR utilizou-se a Equação 3 (Rosa e Tanny, 2015).

$$HSR = \alpha HSR_{NC} = \alpha \rho C_p \frac{dT}{dt} z \approx \alpha \rho C_p \frac{A}{L + s} z \quad (3)$$

Em que α é o factor de calibração, HSR ($W m^{-2}$) é o calor sensível utilizando o método SR, HSR_{NC} ($W m^{-2}$) é o fluxo de calor sensível não calibrado, ρ ($kg m^{-3}$) é a densidade do ar, C_p ($J kg^{-1}^{\circ}C^{-1}$) é o calor específico do ar à pressão constante, $\frac{dT}{dt}$ a taxa de variação da temperatura do ar, A ($^{\circ}C$) e " $L + s$ " (s) são a amplitude da temperatura da rampa e duração da rampa, e z (m) é a altura da medição.

As estimativas de A e " $L + s$ " foram realizadas aplicando-se a análise da função de estrutura, segundo Atta (1977), utilizando os momentos ($S^n(r)$) de segunda, terceira e quinta ordem para um período de 30 min, conforme a Equação 4.

$$S^n(r) = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \sum_{i=1}^{i=m-j} (T_{i+j} - T_i)^n \quad (4)$$

Em que, $S^n(r)$ é o momento, m é o número de pontos de dados, n é a ordem da função da estrutura, j é o retardo da amostra, i é o número do ponto de dados. Os valores A e $L + s$ foram determinados pelas Equações 5, 6, 7 e 8.

$$A^3 + p.A + q = 0 \quad (5)$$

$$p = 10.S^2(r) - \left(\frac{S^5(r)}{S^3(r)}\right) \quad (6)$$

$$q = 10.S^3(r) \quad (7)$$

$$L+s = -\frac{A^3 \cdot r}{S^3(r)} \quad (8)$$

O tempo de retorno (r) adotado para a análise de desempenho foi de 0,5 s.

De acordo com Savage (2017), para as estimativas de H utilizando o SR existe uma recomendação definida para o método onde a rampa ($L + s$) deve ser positiva. Seguindo essa recomendação, foi colocada uma função no Excel que multiplicava por -1 toda vez que o $S^3(r)$ (Equação 4) resultasse em valores positivos, desse modo os valores da rampa (Equação 8) ficam sempre maiores que zero.

Como os lisímetros determinam a evapotranspiração da cultura (ET_c) diretamente, foi necessário utilizar o saldo radiômetro e sensores de calor no solo da estação meteorológica local, para medir o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo, respectivamente.

Desse modo, a ET_c do SR foi convertida em H_{Lis} utilizando as Equações 9 e 10, adaptadas de Sousa et al. (2011); Rosa e Tanny (2015).

$$LE = ET_c \times \rho_{H_2O} \times L \times (0,035^{-1}) \times (0,0864) \quad (9)$$

$$H_{Lis} = R_n - G - LE \quad (10)$$

Em que LE é o fluxo de calor latente de evaporação ($W m^{-2} d^{-1}$), ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm), ρ_{H_2O} é a massa específica da água, considerada como constante ($1000 kg m^{-3}$), L é calor latente de vaporização, considerado como constante ($2,45 MJ kg^{-1}$).

A drenagem dos lisímetros foi realizada a cada dois dias, desse modo a ET_c resultante era dividida por dois, sendo o valor atribuído aos dias referentes. Devido a esse fato, foi aplicada a média de leitura para os dias correspondentes dos dados de HSR_{NC} medidos na estação de SR.

RESULTADO E DISCUSSÃO

O sistema de coleta de dados para estimativa de SR e EC projetado e a posição dos termopares são apresentados na Figura 3.

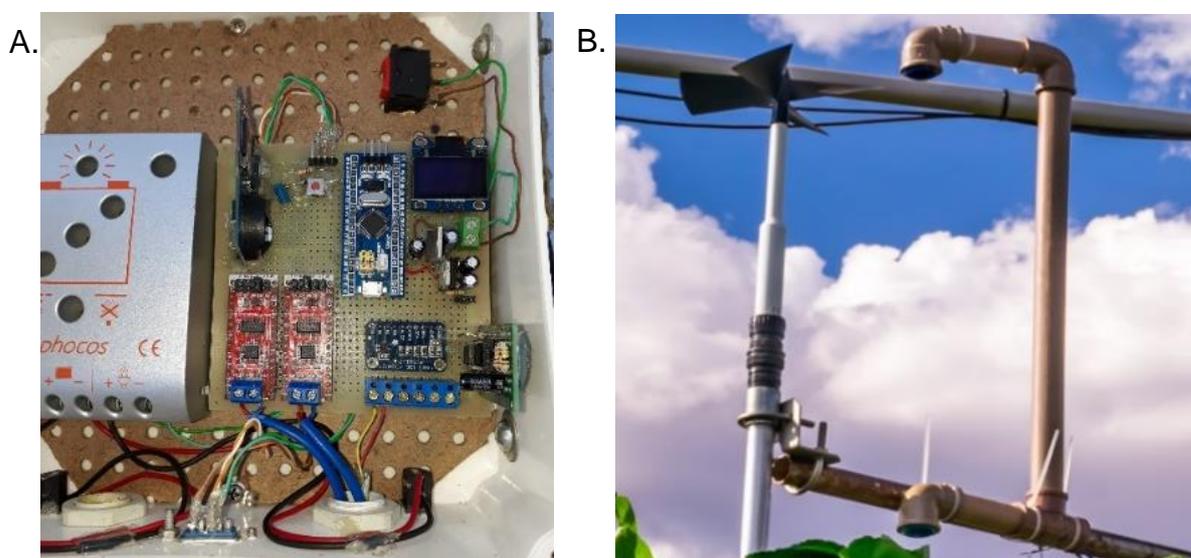


Figura 3. A) Foto da placa instalada na caixa com o controlador de carga e (B) Foto da disposição dos termopares e do anemômetro vertical, com o termopar exposto na extremidade de cada “joelho” de PVC.

A variação típica da temperatura medida pelo termopar em um período de 5 min, durante o dia e durante a noite, é apresentada na Figura 4 A e B.

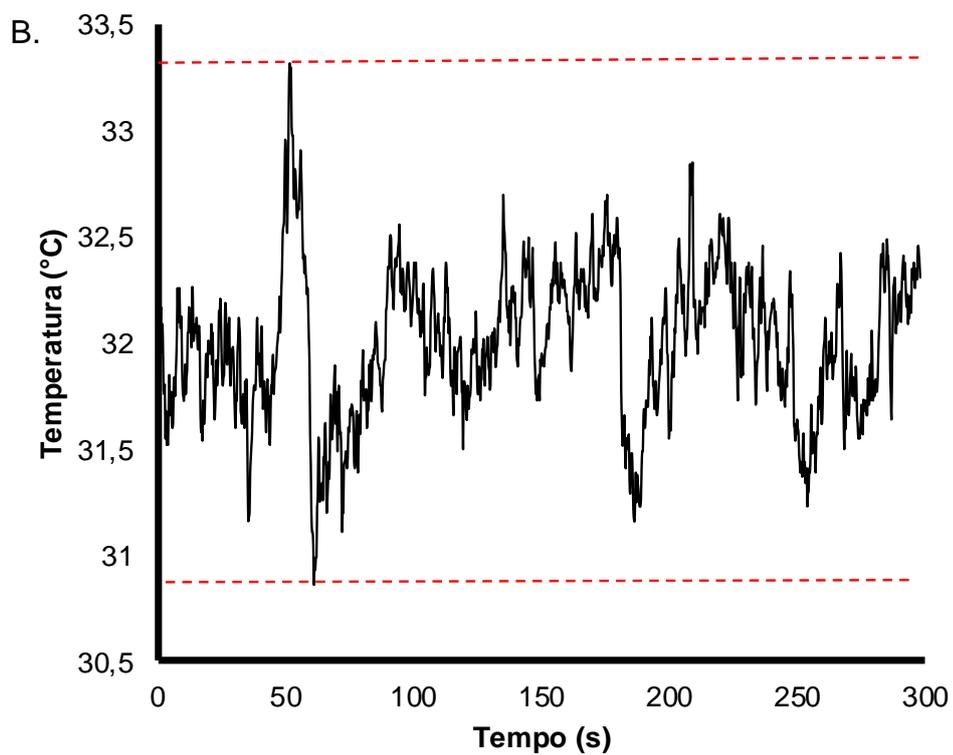
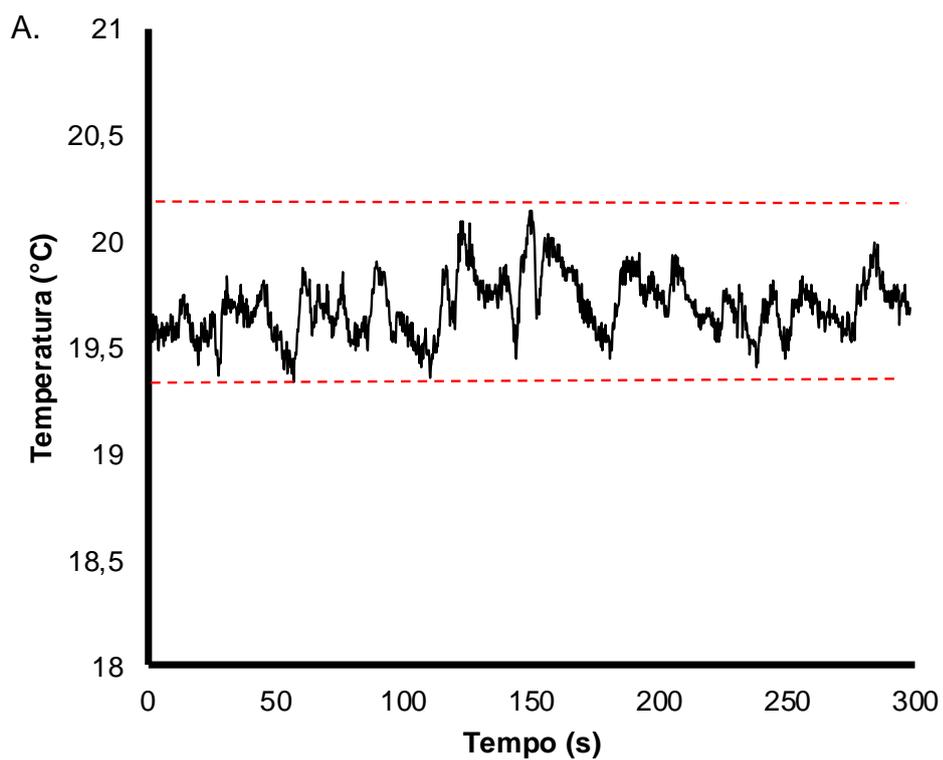


Figura 4. Dados de aquisição da temperatura com o termopar, com a frequência de 4 Hz, no horário de 0h00 até 0h05 (A) e de 12h00 até 12h05 (B) do dia 19 de outubro de 2018.

De acordo com as Figuras 4 A e 4 B, observa-se a formação de “rampas” ao longo do tempo, evidenciando o comportamento do turbilhão de ar descrito pela técnica do SR (Paw e Brunet, 1991). Observa-se ainda que no período noturno a temperatura apresenta maior estabilidade, tendo uma menor faixa de variação de temperatura. No período diurno, a temperatura se apresenta instável, o que proporciona uma variação maior de temperatura em pouco espaço de tempo (Savage, 2017).

As oscilações apresentadas nos gráficos são inerentes ao método do SR, não sendo exclusivamente desvios instrumentais. Esses ruídos são condicionados pela estabilidade ou instabilidade da temperatura no ambiente (Savage, 2017; Hu et al., 2018).

As leituras com o termopar de $76,2 \mu\text{m}$, utilizando a frequência de 4 Hz, apresentaram curvas e rampas ao longo do tempo semelhantes às encontradas por outros autores como Castellví e Snyder (2010) e Haymann et al. (2019).

A qualidade das leituras de temperatura é influenciada diretamente pelo diâmetro do termopar, sendo recomendada a utilização de diâmetros comerciais entre $12,2 \mu\text{m}$ e $76,2 \mu\text{m}$ (Hu et al., 2018).

Fase 1 - Surface Renewal x Lisímetro

De acordo com a Figura 5 A, as leituras do HSR sobre o feijão apresentaram comportamento padrão ao longo do dia, com valores próximo a zero no período noturno e valores maiores na faixa entre 9h00 e 15h00. A estimativa do LE foi realizada para cada dia, e em seguida foi estimado os valores do calor sensível nos lisímetros (H_{lis}), correspondentes. A correlação dos dados de calor sensível não calibrado obtidos pela estação de SR (HSR_{NC}) e a do H_{lis} é apresentada na Figura 5 B.

Os valores apresentados na Figura 5 B representam a média para cada dois dias, uma vez que na lisimetria de drenagem é necessário um tempo superior a um dia para que ocorra a percolação da lâmina de água.

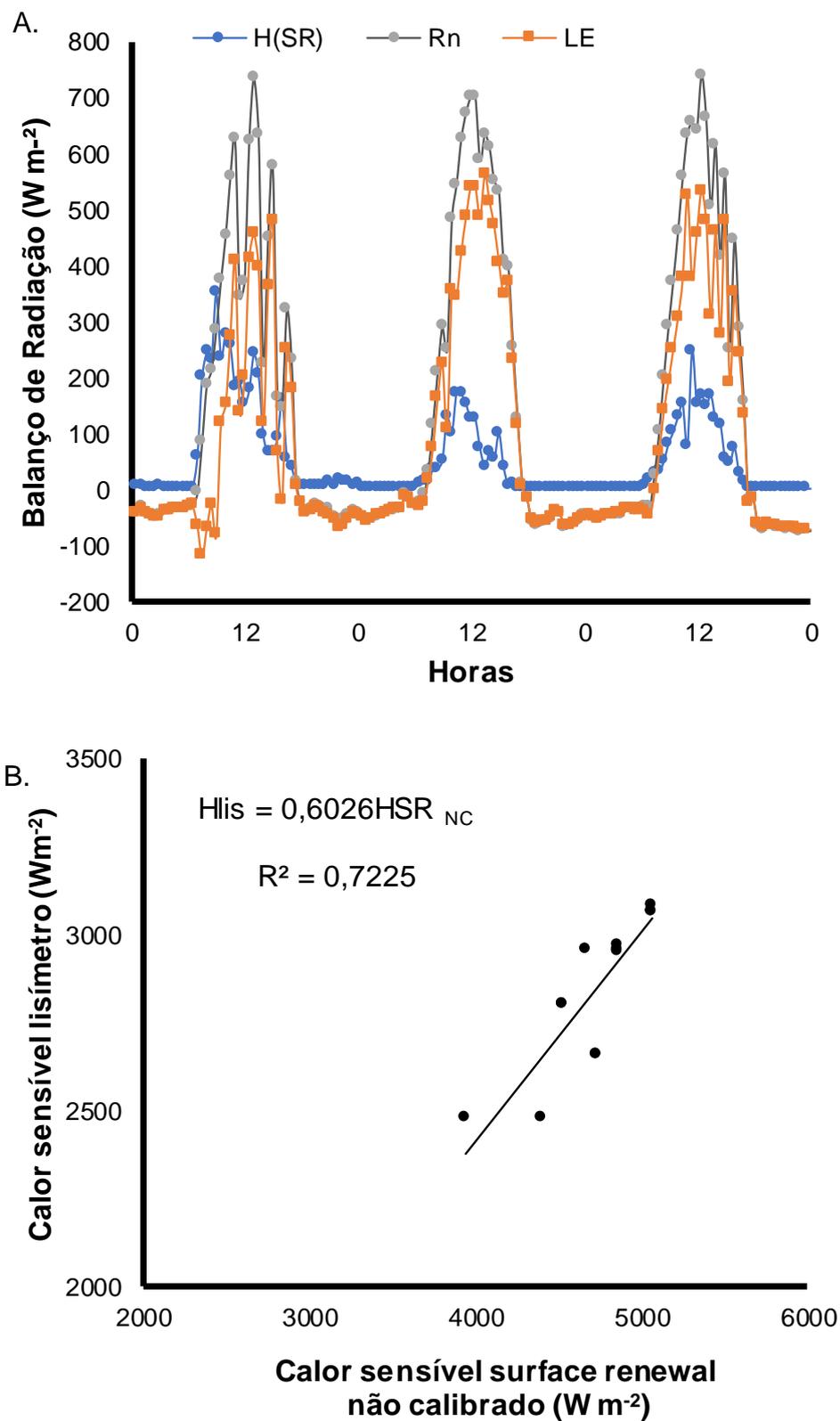


Figura 5. (A) Balanço de radiação dos dias 4, 5 e 6 de outubro de 2018, utilizando as estimativas do LE e as medidas de H_{SR} calibrado e Rn . (B) Correlação entre os valores de H estimados para os lisímetros e os valores de H encontrados utilizando SR não calibrado.

Embora os dois métodos de estimativas apresentem princípios diferentes, um analisa a variação de água no solo e o outro o balanço de radiação na cultura, a correlação entre as leituras apresentou uma Equação de regressão com o $R^2 = 0,7225$, resultado semelhante ao encontrado por Moratíel e Martínez-Cob (2013) utilizando SR para estimativa do H sobre uma cultura de arroz, observaram um $R^2 = 0,78$ em comparação com o H encontrado na lisimetria.

Em estimativas de LE obtidas pelo SR e por lisímetros de pesagem, Castellví e Snyder (2010) encontraram valores de R^2 variando de 0,96 a 0,98, para dados com intervalo de meia hora. O mesmo foi observado em calibração ocorrida na Espanha com R^2 de 0,92 a 0,98 por Zapata e Martínez-Cob (2002). Esses valores são superiores aos deste trabalho, devido ao maior número de dados que lisimetria de pesagem proporciona, sendo possível obter dados em escala horária, tornando mais fácil encontrar dados discrepantes.

O valor de α , para ajustar o valor de HSR_{NC} ao HSR, foi de 0,6026. Esse valor está próximo ao indicado para a altura de 1,6 m em cultivo de arroz (Moratíel e Martínez-Cob, 2013). De acordo com o observado pelos autores, conforme aumenta a altura os valores de α e R^2 tendem a diminuir, devido à influência dos turbilhões de ar de camadas adjacentes.

Os resultados indicam a viabilidade do uso do protótipo de SR para a estimativa do H e conseqüentemente ET_c nas condições edafoclimáticas estudadas, salientando a necessidade de obter dados confiáveis de radiação líquida (R_n) e o fluxo de calor no solo (G) para se obter o ET_c utilizando o método do SR, pois a estimativa do LE como resíduo do balanço de energia requer medições precisas de R_n (Castellví e Snyder, 2010), embora alguns erros são inerentes ao instrumentos (Twine et al., 2000).

Fase 2 - Surface Renewal x Eddy Covariance

Os valores de calor sensível obtidos pela estação de Eddy Covariance comercial ($HEC_{(com)}$) e pelo SR (HSR_{NC}) são apresentados na Figura 6.

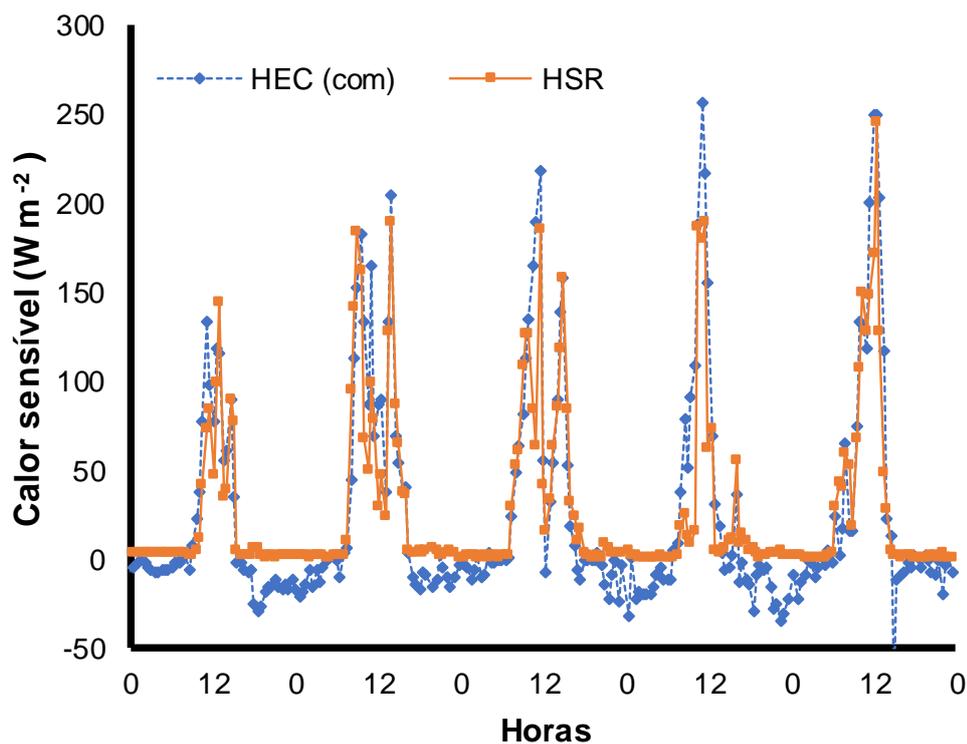


Figura 6. Valores de calor sensível obtidos a cada 30 minutos entre os dias 16 a 20 de outubro de 2018, utilizando as estações de Surface Renewal (HSR_{NC}) e Eddy Covariance comercial ($HEC_{(com)}$).

Observa-se similaridade entre as duas curvas no período diurno, e que no período noturno o $HEC_{(com)}$ apresentava valores negativos enquanto o HSR_{NC} ficava próximo a zero. O comportamento de HSR_{NC} pode ser explicado, devido à condição que deixa a rampa ($L + S$) sempre positiva (Savage, 2017).

A Figura 7 apresenta as regressões entre os valores de HSR_{NC} e $HEC_{(com)}$ medidos a cada 30 minutos (7 A) e com valores diários (7 B). É possível perceber um aglomerado de dados na faixa inferior a 0 W m^{-2} do eixo do $HEC_{(com)}$, esses valores são na sua maioria referentes aos horários noturnos.

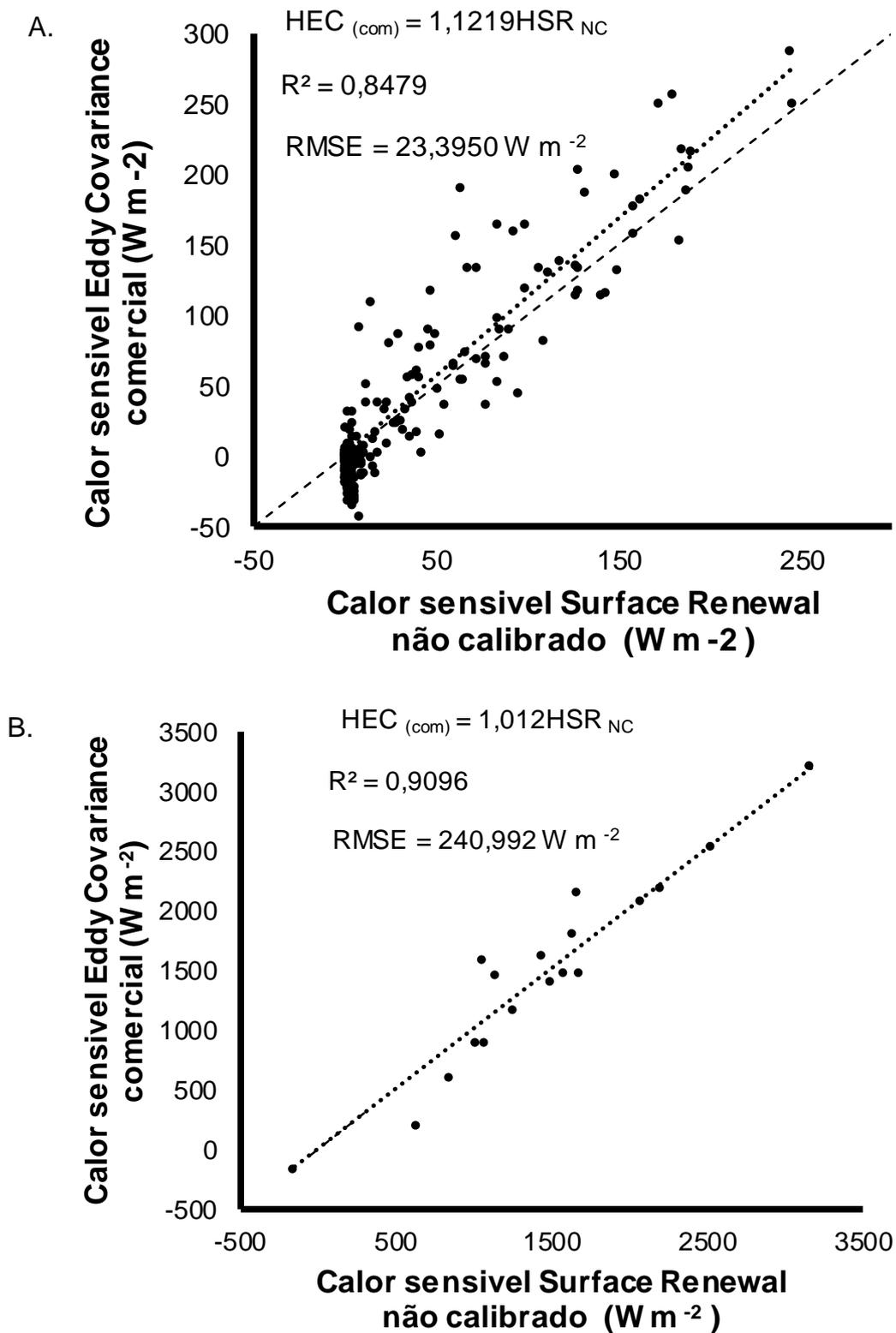


Figura 7. Regressão dos valores de calor sensível a cada 30 min (A) e diário (B), utilizando as estações de surface renewal (HSR_{NC}) e eddy covariance comercial ($HEC_{(com)}$)

As equações de regressões geradas na Figura 7 tiveram o α de 1,1219 com R^2 de 0,8479 para valores a cada 30 minutos, e um α de 1,012 com R^2 0,9096 para valores diários, apresentando RMSE de 23,3950 $W m^{-2}$ e 240,992 $W m^{-2}$, respectivamente. Valores próximos foram observados por Castellví e Snyder (2010) em uma calibração do HSR com a HEC sobre um cultivo de gramíneas, onde encontraram um R^2 de 0,90 com RMSE de 12,9 $W m^{-2}$ em condições de estabilidade, e os coeficientes de calibração α e intercepto nos valores de 1,23 e -1,4, respectivamente. Realizando essa mesma calibração sobre um cultivo de arroz, analisando diferentes alturas, foram obtidos valores de R^2 e coeficiente α nas faixas de 0,737 a 0,847 e 0,685 a 1,916 (Moratíel, e Martínez-Cob,2013).

Em culturas de maior porte como o algodão, a calibração encontrou valores de R^2 , coeficientes α e RMSE nas faixas de $0,54 \pm 0,084$, $0,99 \pm 0,2$ e $56,74 \pm 6,21 W m^{-2}$, respectivamente (Haymann et al., 2019).

Todos esses valores são coerentes aos encontrados pelo equipamento sobre a cultura do limoeiro. Isto indica que o sistema apresentou resultados satisfatórios para a utilização da metodologia do SR, podendo ser utilizado para a estimativa do calor sensível H em diversas culturas, necessitando apenas de uma calibração prévia para cada cultura.

Fase 2: Eddy Covariace construído x Eddy Covariace comercial

O calor sensível obtido pelo protótipo de eddy covariance proposto (EC_(cons)) também apresentou maiores valores no período entre 9h00 e 15h00 (Figura 8 A), porém apresentou ruídos nos outros períodos do dia. Essa variação ocorreu principalmente em períodos chuvosos e/ou com alta incidência de ventos, podendo então atribuí-la à limitação da precisão do anemômetro vertical usado.

Na Figura 8 B são apresentados os dados de HEC_(cons) e HEC_(com), para intervalos de 30 min. A Equação da regressão gerada apresentou um α de 0,8863 com R^2 de 0,6969 e RMSE 39,578 $W m^{-2}$. São resultados satisfatórios, porém compreendem apenas os dias que a EC_(cons) não apresentou ruídos nas leituras. Em dias chuvosos ou com forte incidência de vento, os dados do anemômetro vertical utilizado se mostravam incoerentes, limitando assim a eficiência do processo.

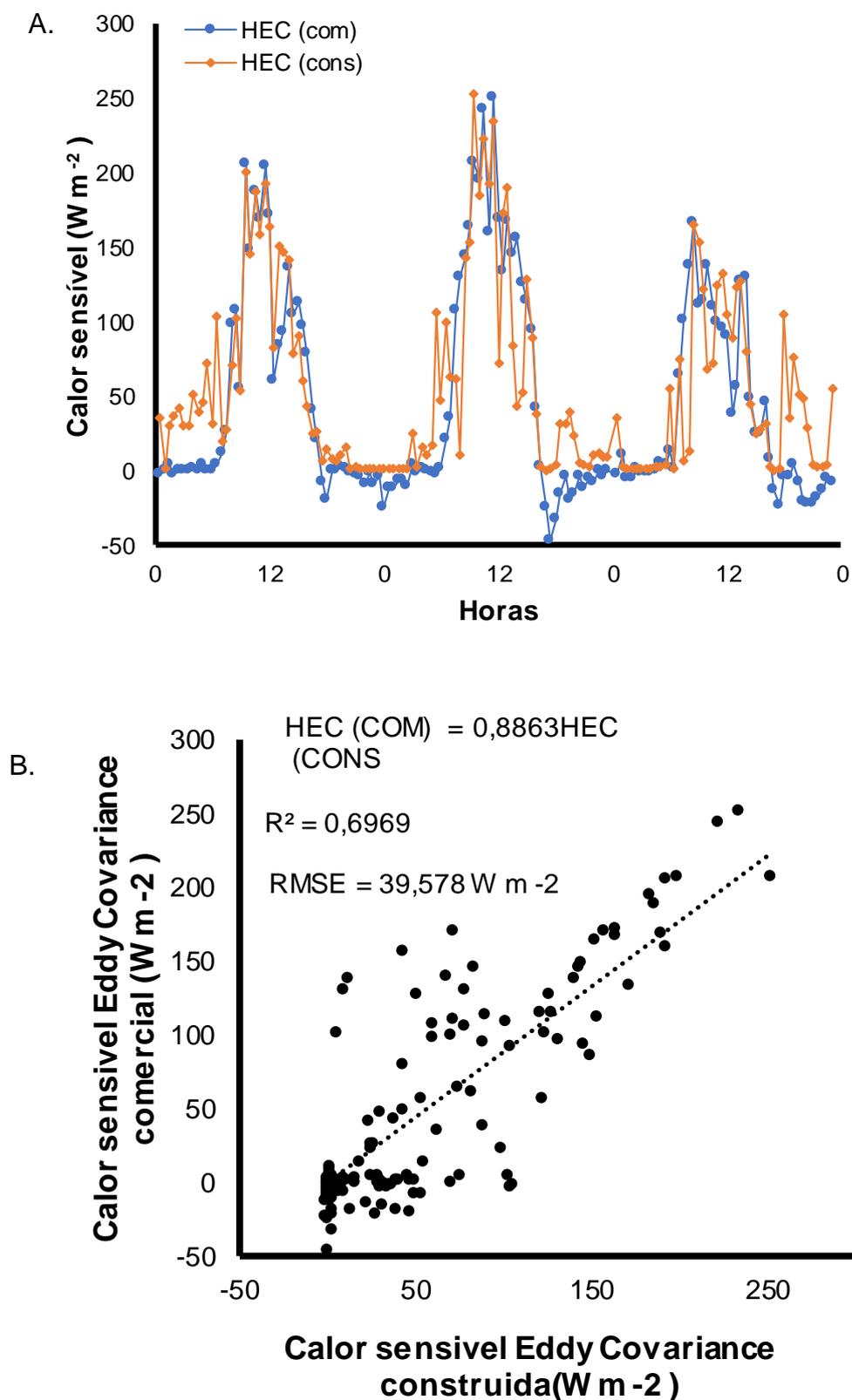


Figura 8. Valores de calor sensível obtidos com as estações de eddy covariance construída ($\text{EC}_{(\text{cons})}$) e eddy covariance comercial ($\text{HEC}_{(\text{com})}$) obtidos a cada 30

minutos entre os dias 17 a 19 de novembro de 2018, e (B) regressão dos valores de calor sensível a cada 30 min.

CONCLUSÃO

Ao todo foram investidos, aproximadamente, R\$ 2000,00 em componentes para o desenvolvimento do sistema, que se mostrou um equipamento mais simples e menos robusto que os encontrados no mercado.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido apresentou resultados satisfatórios para a estimativa do calor sensível utilizando a metodologia de surface renewal, sendo uma alternativa de equipamento, de custo acessível, que pode ser aplicado em outras áreas cultivadas.

Nas leituras utilizando o método eddy covariance, o sistema de aquisição apresentou bons resultados, porém teve a eficiência prejudicada devido às limitações do modelo de anemômetro utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109
- Atta, G. A. V. (1977). Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Archives of Mechanics*, 29(1), 161-171.
- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (Eds.). (2012). *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer Science & Business Media.
- Barbosa, B. D. S., Oliveira, F. G., Figueiredo, F. P. (2015). Determinação do coeficiente de cultivo (Kc) do capim Tanzânia irrigado no norte de Minas Gerais. *IRRIGA*, 1(2), 11-20.
- Castellví F., Snyder, R. L. (2010). A comparison between latent heat fluxes over grass using a weighing lysimeter and surface renewal analysis. *Journal of hydrology*, 381(3-4), 213-220.

- Echeverría, C. P., Sepúlveda-Reyes, D., Ortega-Farías, S. (2014). Effect of height and time lag on the estimation of sensible heat flux over a drip-irrigated vineyard using the surface renewal (SR) method across distinct phenological stages. *Agricultural Water Management*, 141, 74-83.
- Haymann, N., Lukyanov, V., Tanny, J. (2019). Effects of variable fetch and footprint on surface renewal measurements of sensible and latent heat fluxes in cotton. *Agricultural and forest meteorology*, 268, 63-73.
- Hu, Y., Buttar, N. A., Tanny, J., Snyder, R. L., Savage, M. J., Lakhari, I. A. (2018). Surface Renewal Application for Estimating Evapotranspiration: A Review. *Advances in Meteorology*, 2018.
- Jordão, M. D., Paiva, K. D., Firmo, H. T., Inácio, C. T., Rotunno Filho, O. C. (2017). Low-cost automatic station for compost temperature monitoring. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 21(11), 809-813.
- Lopes, O. D., Kobayashi, M. K., Oliveira, F. G., Alvarenga, I. C., Martins, E. R., Corsato, C. E. (2011). Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(6), 548-553.
- Moratiel, R., Martínez-Cob, A. (2013). Evapotranspiration and crop coefficients of rice (*Oryza sativa* L.) under sprinkler irrigation in a semiarid climate determined by the surface renewal method. *Irrigation science*, 31(3), 411-422.
- Paw U.K.T., Brunet Y. (1991). A surface renewal measure of sensible heat flux density. In preprints, *20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, September 10-13, 1991, Salt Lake City, Utah. American Meteorological Society, Boston, MA. p. 52-53.
- Rosa, R., Tanny, J. (2015). Surface renewal and eddy covariance measurements of sensible and latent heat fluxes of cotton during two growing seasons. *Biosystems Engineering*, 136, 149-161.
- Savage, M. J. (2017). Estimation of grass reference evaporation and sensible heat flux using surface renewal and Monin-Obukhov similarity theory: A simple implementation of an iterative method. *Journal of Hydrology*, 547, 742-754.
- Silva, G. H. D., Dias, S. H., Ferreira, L. B., Santos, J. É., Cunha, F. F. D. (2018). Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Jaíba, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 83-89.

- Silva, R. B. D., Leal, L. D. S., Alves, L. S., Brandão, R. V., Alves, R. D. C. M., Klering, E. V., Pezzi, R. P. (2015). Estações meteorológicas de código aberto: Um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(1), 1505.
- Sousa Lima, J. R., Antonino, A. C. D., de Oliveira Lira, C. A. B., de Souza, E. S., da Silva, I. D. F. (2011). Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica*, 42(1), 65-74.
- Twine, T.E., Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesely, M. L.. (2000). Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3), 279-300.
- Zapata, N., Martínez-Cob, A. (2002). Evaluation of the surface renewal method to estimate wheat evapotranspiration. *Agricultural water management*, 55(2), 141-157.

3.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE SURFACE RENEWAL PARA ESTIMATIVA DE CALOR SENSÍVEL EM CULTIVO DE LIMA ÁCIDA “TAHITI”

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho realizar a calibração e validação em diferentes alturas e tempos de retorno do método de surface renewal para estimativa do calor sensível no cultivo de lima ácida Tahiti no norte de Minas Gerais. O equipamento foi desenvolvido em laboratório, em Campos dos Goytacazes-RJ, e a calibração e validação foi realizada sobre um cultivo de lima ácida Tahiti em uma área monitorada por uma estação comercial de eddy covariance, em Jaíba-MG. A calibração foi realizada entre os dias 19 a 26 de outubro de 2018 e foram adotadas duas diferentes alturas e oito diferentes tempos de retorno (r). A validação foi realizada entre os dias 16 e 27 de novembro de 2018. Os fatores de calibração variaram de 1,313 a 8,9676 com R^2 de 0,75 a 0,80 para altura de 0,4 m e de 0,5743 a 4,6619 com R^2 de 0,66 a 0,82 para altura de 0,8 m. Para as alturas de 0,4 m e 0,8 m, os melhores tempos de retorno observados foram de 0,25 s e 0,5 s, respectivamente. A técnica de surface renewal se mostrou viável para estimativa de calor sensível em lima ácida Tahiti.

Palavras-chave: eddy covariance, balanço de energia, consumo hídrico, limoeiro.

CALIBRATION AND VALIDATION OF THE RENEWAL SURFACE METHOD FOR SENSITIVE HEAT ESTIMATION IN TAHITI ACID LIME

ABSTRACT

This study was carried out to perform a calibration and validation at different heights and return times of the surface renewal method to estimate the sensitive heat in 'Tahiti' acid lime fruits cultivated in northern Minas Gerais, Brazil. The equipment was developed in a laboratory, in Campos dos Goytacazes-RJ, Brazil, and calibration and validation were performed on the 'Tahiti' acid lime cultivated in an area monitored by a commercial eddy covariance station in Jaíba-MG, Brazil. The calibration was performed from October 19 to 26, 2018 and two different heights and eight different return times were adopted. The validation was performed between November 16 and 27, 2018. Calibration factors ranged from 1,313 to 8,996 with R^2 from 0.75 to 0.80 for a height of 0.4 m and from 0.5743 to 4,6619 with R^2 from 0.66 to 0.82 to a height of 0.8 m. For heights of 0.4 m and 0.8 m, the best observed return times were 0.25 and 0.5 s, respectively. The surface renewal technique proved to be viable for estimating sensitive heat in the crop 'Tahiti' acid lime.

Keyword: eddy covariance, energy balance, water consumption, lemon tree.

INTRODUÇÃO

O cultivo de lima ácida Tahiti, *citrus latifolia* Tan., é tida como uma alternativa para aumentar a diversidade de cultivos comerciais na região norte de Minas Gerais. É potencialmente viável devido à boa adaptação às condições climáticas tropicais e ao maior valor econômico em relação a outro citrus, principalmente na região do perímetro irrigado de Jaíba-MG (Rodrigues et al., 2016). Por se tratar de uma região com escassez hídrica, torna-se necessário a utilização de boas práticas e de métodos que otimizem o uso da água.

Esses métodos podem ser baseados em parâmetros do solo, da planta ou da atmosfera, sendo que devido ao tamanho das áreas de cultivos os métodos via atmosfera demonstram ser mais representativos e homogêneos (Echeverría, et al. 2014). Esses baseiam-se, principalmente, no balanço de energia na superfície terrestre em uma extensão micrometeorológica. Dentre os métodos

micrometeorológicos, se destaca, pela precisão e pela maior eficiência, o método da eddy covariance (EC). O método EC realiza leituras da variação escalar de variáveis atmosféricas de interesse, em alta frequência de amostragem, na pressuposição que estas variações são provocadas por turbilhões de ar (Aubinet et al., 2012). Porém, o uso da EC é limitado a grandes centros de pesquisa ou universidades devido a seu alto custo, complexidade de operação e exigência de manutenção cuidadosa (Drexler et al., 2004; Castellví e Snyder, 2010; Haymann et al., 2019).

A técnica do surface renewal (SR) é apresentada como uma alternativa ao EC para estimativa do fluxo de calor sensível (H) nas culturas. A técnica SR é baseada nas medições de temperatura, em alta frequência de amostragem, dos fluxos de ar que se movem na superfície ou no dossel da planta (Paw e Brunet, 1991). A SR se destaca por ser um método mais econômico, portátil e robusto para estimar o consumo hídrico das plantas (Castellví e Snyder, 2010; Echevériá, et al. 2014), e devido SR utilizar apenas temperatura, aumenta a possibilidade de obter replicações no campo (Castellvi, 2004).

Contudo, a SR requer uma calibração prévia, uma vez que a duração e a frequência de renovação do ar circundante ao dossel das plantas são variáveis para diferentes alturas e culturas (Rosa e Tanny, 2015). Desta forma, objetivou-se com este trabalho realizar a calibração e validação em diferentes alturas e tempos de retardo do método do surface renewal para estimativa do calor sensível no cultivo de lima ácida Tahiti no norte de Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODO

O equipamento para utilização da SR foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Agrícola no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ. Para sua confecção utilizaram-se dois termopares de fio 76,2 μm , dois módulos para leitura de termopar baseados no circuito integrado MAX31856, uma placa de desenvolvimento modelo STM32F103C8T6, um módulo de Micro SD, um módulo RTC DS-3231, um módulo conversor analógico digital ADS 1115, conectores, resistores, jumps, uma placa fotovoltaica, um controlador de carga, um painel solar automático de 10 A e 12 v, uma bateria de 7 A. O algoritmo de

programação foi realizado utilizando o software aberto Arduino IDE™, sendo programado para realizar leituras dos dois termopares com uma frequência de amostragem de 4 Hz.

A calibração e validação foram realizadas junto a uma estação de eddy covariance sobre um cultivo de lima ácida Tahiti, *citrus latifolia* (Yu. Tanaka) Tanaka cv. IAC 5, plantando na Fazenda Saara, situada no projeto Jaíba, Latitude 15° 03'35,4" e Longitude 43° 47' 52,7". O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação Köeppen (Silva et al., 2018). A calibração foi realizada de 19 a 26 de outubro de 2018, e a validação foi realizada no período de 16 a 23 de novembro de 2018.

A lima ácida Tahiti foi plantada em agosto de 2010 com o espaçamento de 7 m x 5 m em uma área total de 35,78 ha, irrigado por gotejamento. A estação de eddy covariance posicionada sobre o dossel da cultura é composta com um anemômetro sônico tridimensional modelo CSAT3, Campbell Scientific, um analisador de CO₂/H₂O infravermelho de caminho aberto modelo LI-7500, LICOR Biosciences, um saldo radiômetro modelo NR-Lite, Kipp&Zonen, sensores de temperatura e umidade relativa modelo HMP155A-L. As leituras eram realizadas a uma taxa de amostragem de 10 Hz e armazenadas no datalogger CR1000, Campbell Scientific.

Para estimativa de calor sensível utilizando o método EC, foi utilizada a Equação 1 de acordo com Echeverría et al. 2014.

$$HEC = \rho_{ar} C_p \overline{\omega' \cdot T'} \quad (1)$$

Em que, HEC é calor sensível utilizando o método de EC (W m⁻²), T' é o componente turbulento da temperatura do ar (°C), ω' é o componente turbulento das flutuações do vento vertical (m s⁻¹), Cp é o calor específico do ar à pressão constante (J kg⁻¹°C⁻¹), ρ_{ar} é a densidade do ar (kg m⁻³), sendo esses dois últimos considerados valores constantes.

A média dos produtos entre o desvio da velocidade vertical do vento e o desvio da temperatura do ar para um período de 30 min, foi obtida pela Equação 2.

$$\overline{\omega' \cdot T'} = \frac{1}{m} \sum_i^m (\omega_i - \bar{\omega})(T_i - \bar{T}) \quad (2)$$

Em que $\overline{\omega' \cdot T'}$ é a média dos produtos entre o desvio da velocidade vertical do vento e o desvio da temperatura do ar.

Para estimava do calor sensível utilizando o método SR utilizou-se a Equação 3 (Rosa e Tanny, 2015).

$$\text{HSR} = \alpha \text{HSR}_{\text{NC}} = \alpha \rho C_p \frac{dT}{dt} z \approx \alpha \rho C_p \frac{A}{L+s} z \quad (3)$$

Em que α é o factor de calibração, HSR (W m^{-2}) é o calor sensível utilizando o método SR, HSR_{NC} (W m^{-2}) é o fluxo de calor sensível não calibrado, $\frac{dT}{dt}$ a taxa de variação da temperatura do ar, A ($^{\circ}\text{C}$) é a amplitude da temperatura da rampa, “ $L + s$ ” (s) são a duração da rampa, respectivamente e z (m) é a altura da medição.

As estimativas de A e “ $L + s$ ” foram realizadas aplicando-se a análise da função de estrutura, segundo Atta (1977) utilizando os momentos ($S^n(r)$) de segunda, terceira e quinta ordem para um período de 30 min, conforme a Equação 4.

$$S^n(r) = \left(\frac{1}{m}\right) \cdot \sum_{i=1}^{i=m-j} (T_{i+j} - T_i)^n \quad (4)$$

Em que, $S^n(r)$ é o momento, m é o número de pontos de dados, n é a ordem da função da estrutura, j é o retardo da amostra, i é o número do ponto de dados. Os valores A e $L + s$ foram determinados pelas Equações 5, 6, 7 e 8

$$A^3 + p.A + q = 0 \quad (5)$$

$$p = 10 \cdot S^2(r) - \left(\frac{S^5(r)}{S^3(r)}\right) \quad (6)$$

$$q = 10 \cdot S^3(r) \quad (7)$$

$$L+s = - \frac{A^3 \cdot r}{S^3(r)} \quad (8)$$

Em que r é o tempo de retardo, em segundos.

De acordo com Savage (2017), para as estimativas de H utilizando o SR existe uma recomendação definida para o método onde a duração da rampa ($L + s$) deve ser positiva. Seguindo essa recomendação, foi colocada uma função no Excel que multiplicava por -1 toda vez que o $S^3(r)$ (Equação 4) resultasse em valores positivos, desse modo os valores da rampa (Equação 8) ficam sempre maiores que zero.

Para a calibração, foram adotadas duas diferentes alturas (z). O primeiro termopar ficou a $z_1=0,4$ m e o segundo a $z_2=0,8$ m da copa cultura. Oito diferentes tempos de retardo (r) foram utilizados, sendo eles $r_1= 0,25$ s; $r_2= 0,50$ s; $r_3= 0,75$ s; $r_4= 1,00$ s; $r_5= 1,25$ s; $r_6= 1,50$ s; $r_7= 1,75$ s; e $r_8= 2,00$ s. Foram utilizados os dados dos dia 19 a 26 de outubro de 2018, e as variáveis estudadas foram $HSR_{z_1r_1}$, $HSR_{z_1r_2}$, $HSR_{z_1r_3}$, $HSR_{z_1r_4}$, $HSR_{z_1r_5}$, $HSR_{z_1r_6}$, $HSR_{z_1r_7}$, $HSR_{z_1r_8}$, $HSR_{z_2r_1}$, $HSR_{z_2r_2}$, $HSR_{z_2r_3}$, $HSR_{z_2r_4}$, $HSR_{z_2r_5}$, $HSR_{z_2r_6}$, $HSR_{z_2r_7}$, $HSR_{z_2r_8}$. Para isso foram realizadas regressões para cada variável entre os valores de HEC e HSRi.

A validação dos dados foi realizada do dia 16 a 23 de novembro de 2018, com intuito de verificar a eficácia da calibração. Nessa etapa foram utilizados os dados não calibrados (HSR_{NC}) e os dados calibrados (HSR_i), obtidos anteriormente, comparando-os com os valores de HEC utilizando o erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE).

Ainda na validação, foram utilizados os resultados de calor sensível de duas variáveis, uma para cada altura, para assim estimar o calor latente obtido pelo método do surface renewal (LESR) utilizando a Equação de balanço de energia adaptada, Equação 9:

$$LE_{SR}=R_n - G - HSR \quad (9)$$

Em que o R_n é o saldo de radiação ($W m^{-2}$) e G é o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$). Esses dados foram obtidos pelos equipamentos presentes na estação de eddy covariance. Os valores de LESR estimados foram comparados com os valores de calor latente adquiridos pela estação de eddy covariance (LEEC).

RESULTADO E DISCUSSÃO

Na Figura 1 é apresentado o padrão de variação dos dois termopares medindo a temperatura em condições de baixa turbulência do ar.

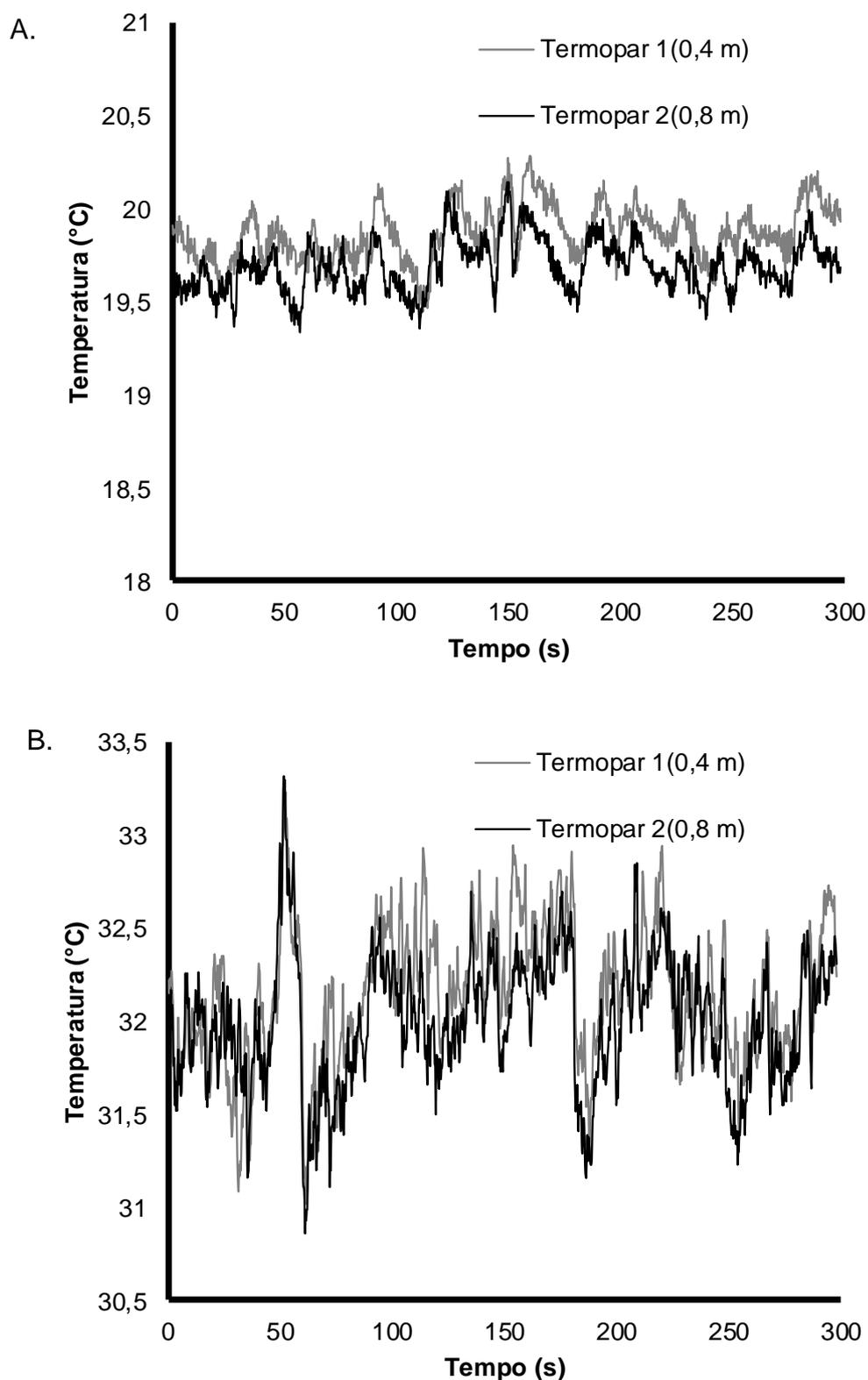


Figura 1. Padrão de variação dos valores de temperatura do ar capturado pelos termopares 1 e 2, com a frequência de amostragem de 4 Hz, medidos sob cultivo de lima ácida Tahiti no horário de 0h00 até 0h05 (A) e de 12h00 a 12h05 (B) do dia 19 de outubro de 2018.

De acordo com a Figura 1, observa-se que o termopar 1 apresenta leituras de temperatura maiores que o termopar 2. Isso ocorre devido à proximidade da cultura. Quanto mais próximo a cultura, maior será a troca de escalares. Em condições de maior turbulência do ar (B) essa diferença é menos pronunciada que em condições de menor turbulência do ar (A). Isso pode ser explicado devido à maior taxa de troca de escalares entre a planta e a atmosfera. French et al. (2012) afirmaram que as rampas no período noturno apresentam formações inconsistentes devido à baixa troca de escalares e à estabilidade da atmosfera.

No SR, a calibração é geralmente obtida pela inclinação da regressão forçada pela origem entre HEC e HSRnc assumindo intercepto igual a zero (Echeverría et al, 2014)

A Tabela 1 apresenta os valores de regressão das 16 combinações de HSRnc com HEC, para a cultura de lima ácida Tahiti.

Tabela 1. Coeficientes de calibração α e R^2 encontrados nas regressões das Figura 2 A e 2 B, erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE), medidos sob cultivo de lima ácida Tahiti nos dias de 19 a 26 de outubro de 2018

Variável	Alfa (α)	R^2	RMSE (Wm^{-2})	MAE (Wm^{-2})
HSR _{z1r1}	1,313	0,80	29,85704	20,73084
HSR _{z1r2}	2,625	0,80	44,46189	27,22614
HSR _{z1r3}	3,935	0,80	50,50318	29,51587
HSR _{z1r4}	5,2466	0,80	53,64911	30,66899
HSR _{z1r5}	6,5582	0,75	55,56661	31,36129
HSR _{z1r6}	7,6868	0,75	56,85603	31,82553
HSR _{z1r7}	8,9679	0,75	57,78208	32,1628
HSR _{z1r8}	10,249	0,75	58,47923	32,41624
HSR _{z2r1}	0,5743	0,82	50,00814	30,71194
HSR _{z2r2}	1,1487	0,82	26,22582	17,86103
HSR _{z2r3}	1,723	0,82	35,08758	21,83417
HSR _{z2r4}	2,2974	0,82	41,44878	24,70977
HSR _{z2r5}	2,8717	0,82	45,59584	26,54492
HSR _{z2r6}	3,4964	0,66	51,48762	29,25341
HSR _{z2r7}	4,0204	0,82	50,54471	28,73846
HSR _{z2r8}	4,6619	0,66	54,35665	30,52156

Nas Figuras 2 A e 2 B, apresentam-se os gráficos de correlação entre os valores de HEC e de HSRnc para os termopares 1 e 2, respectivamente.

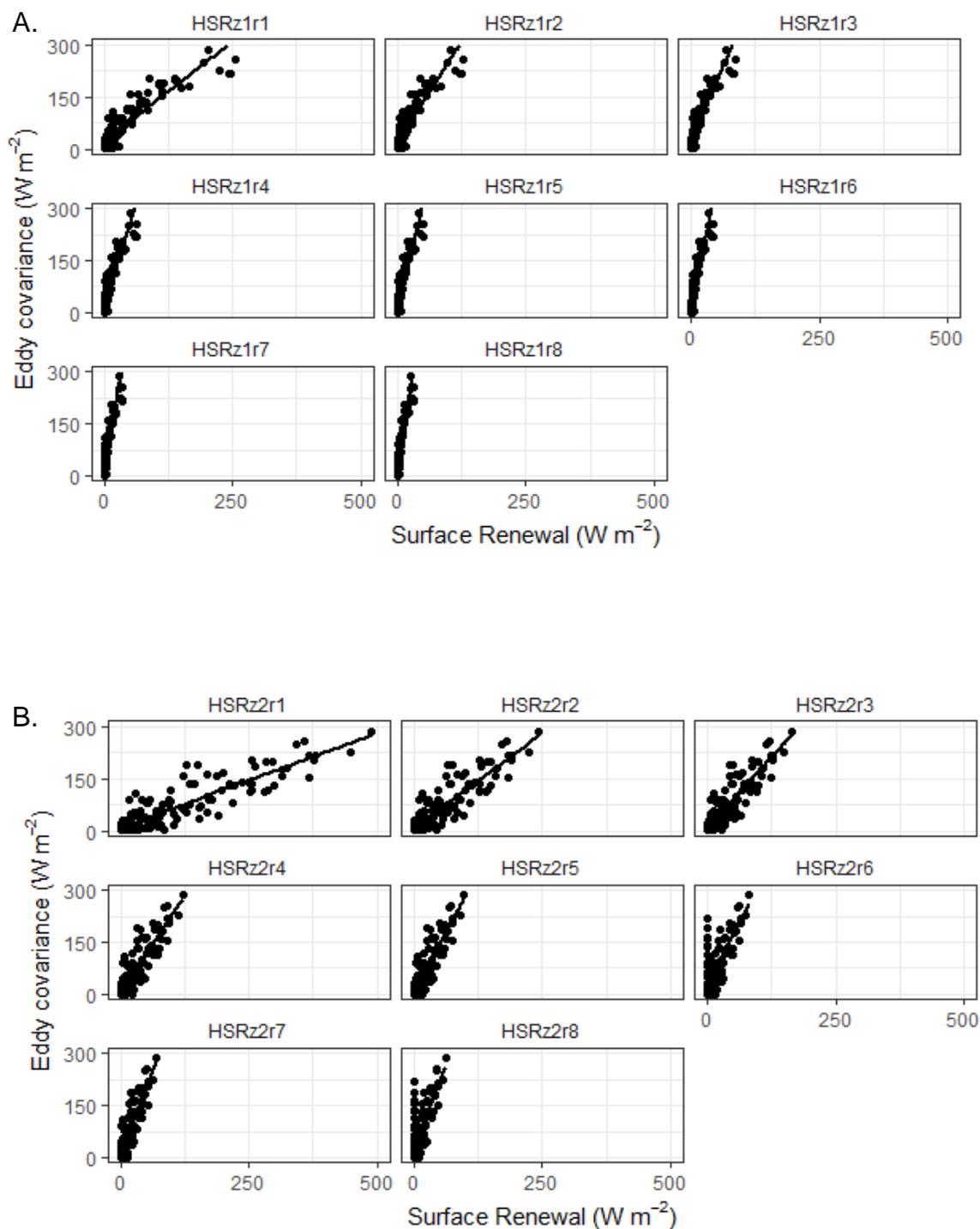


Figura 2. Eddy Covariance x Surface Renewal não calibrado em diferentes tempos de retorno medidos pelo termopar 1 (A) e termopar 2 (B), sob cultivo de lima ácida Tahiti nos dias de 19 a 26 de outubro de 2018.

Pela Figura 2 é possível verificar um padrão de variação semelhante nos valores obtidos de HSR entre as duas alturas de medição. Conforme aumenta o tempo de retardo o coeficiente de inclinação (α), do ajuste entre HSRnc com HEC também aumenta, conforme é apresentado na Tabela 1. A mesma tendência foi verificada no trabalho de French et al. (2012), que analisaram intervalos de tempo variando de 0,5 s a 3,0 s.

Destaca-se também, que os HSRnc medidos pelo termopar 2, mais elevado, foram superiores aos medidos pelo termopar 1. Em consequência disso, os valores de α foram menores nas medições do termopar mais alto, resultado condizente ao relatado por Paw U et al. (2005). De acordo com Mekhmandarov et al. (2015), os valores do fator de calibração tendem a diminuir conforme a altura da medição é aumentada, sendo mais acentuado principalmente pelas leituras em condições turbulentas (Suvočarev et al., 2014).

Outro fato observado nos trabalhos de Mekhmandarov et al. (2015) e Suvočarev et al. (2014) é que o R^2 , ao contrário do α , apresenta uma relação direta com a altura de medição, ou seja, conforme aumenta a altura o R^2 também aumenta. Esse resultado também foi encontrado nas calibrações apresentadas na Tabela 1, com exceção dos HSR_{z2r6} e HSR_{z2r8}.

O valor de α aumenta conforme aumenta o intervalo de tempo das leituras, crescendo de maneira similar para cada altura estudada, condizente ao apresentado por Paw U et al. (2005). Os autores também observaram que o R^2 diminui com o aumento do intervalo de tempo das leituras, semelhante ao observado na Tabela 1.

Os coeficientes de correlação foram semelhantes nas duas alturas. Para o termopar 2, os tempos de retardo de 1,5 s e 2 s apresentaram coeficientes menores que os demais. Para o termopar 1, os tempos de retorno de 0,25 s, 0,50 s, 0,75 s e 1,00 s apresentaram correlação semelhantes e maior desempenho que os demais. Isso também é relatado no trabalho de Snyder et al. (1996), que afirmaram que o SR tem desempenho similar nos quatro tempos de atraso.

Os valores do fator de calibração variaram de 1,313 a 8,9676 para altura de 0,4 m e de 0,5743 a 4,6619 para altura de 0,8 m. Esses valores são superiores ao encontrado por Snyder e O'Connell (2007) para cultivo de citrus, onde realizaram calibrações utilizando termopar de 76,2 μm em 2001 e 2003 com altura acima do dossel de 0,5 m e 0,2 m. Os autores utilizaram tempos de retardo de 0,5 s e 1,0 s

e encontraram valores de α variando de 0,226 a 0,227 e R^2 de 0,85 a 0,996. Haymann et al. (2019) trabalhando com algodão, encontraram valores de R^2 , coeficientes α e RMSE nas faixas de $0,54 \pm 0,084$, $0,99 \pm 0,2$ e $56,74 \pm 6,21 \text{ W m}^{-2}$.

A maior taxa de variação deste trabalho que a encontrada em outros trabalhos é devido, principalmente, à utilização de intervalos de tempos maiores. Nos estudos de SR os intervalos de tempo analisados, geralmente, variam de 0,2 a 0,5 s e 0,5 a 1,0 s para culturas baixas e altas, respectivamente (Paw U et al., 2005; Mekhmandarov et al., 2015), sendo que intervalos de tempos superiores ainda são pouco relatados.

Na Tabela 1 observa-se que os intervalos de tempo de 1,25 e 1,75, tiveram R^2 semelhantes aos dos intervalos de tempos de 0,25 a 1,0 s das duas alturas de medição. A utilização de tempos de retardos mais longos, implicaria na diminuição da taxa de amostragem de dados, reduzindo assim o consumo de memória e o tempo necessário para que processador do equipamento possa calcular os valores de HSR automaticamente. Porém, é necessário ter cuidado ao adotar tempo de retardo maior que 1,0, pois podem elevar as durações de formação da rampa e a formação irregular (Suvočarev et al., 2019).

Os valores de RMSE e MAE apresentaram o mesmo padrão de variação que o α para as duas alturas estudadas, apresentando crescimento similar à medida que o tempo de retardo aumentava. Esse fato também foi observado por French et al (2012), analisando tempos de retorno até 3 s. Os autores constataram que tempos de retorno muito curtos ou muito longos, resultam em dados menos precisos de HSRnc. Isso foi observado na variável HSR_{z2r1} (0,25 s), que apresentou RMSE e MAE superiores à variável HSR_{z2r2} (0,50 s). Uma explicação para esse acontecimento, pode ser atribuída na suposição que a função de estrutura de Atta (1977) baseia-se que o tempo de retardo é menor que o período de formação das rampas, ou seja, em casos em que a frequência da rampa seja mais baixa, a utilização de atrasos mais longos, (neste caso 0,5 s), apresenta resultados mais precisos na estimativa do calor sensível (Echeverría et al, 2014).

Entre todas as medições os menores valores de RMSE e MAE, foram encontrados no HSR_{z2r2} , que também apresentou o HSRnc mais próximo ao HEC, gerando um coeficiente α no valor de 1,148. No termopar 1 os menores valores RMSE e MAE foram encontrados no HSR_{z1r1} (0,25 s), e apresentou um coeficiente α no valor de 1,313.

A Figura 3 apresenta o comportamento dos dados de HEC e HSR calibrado.

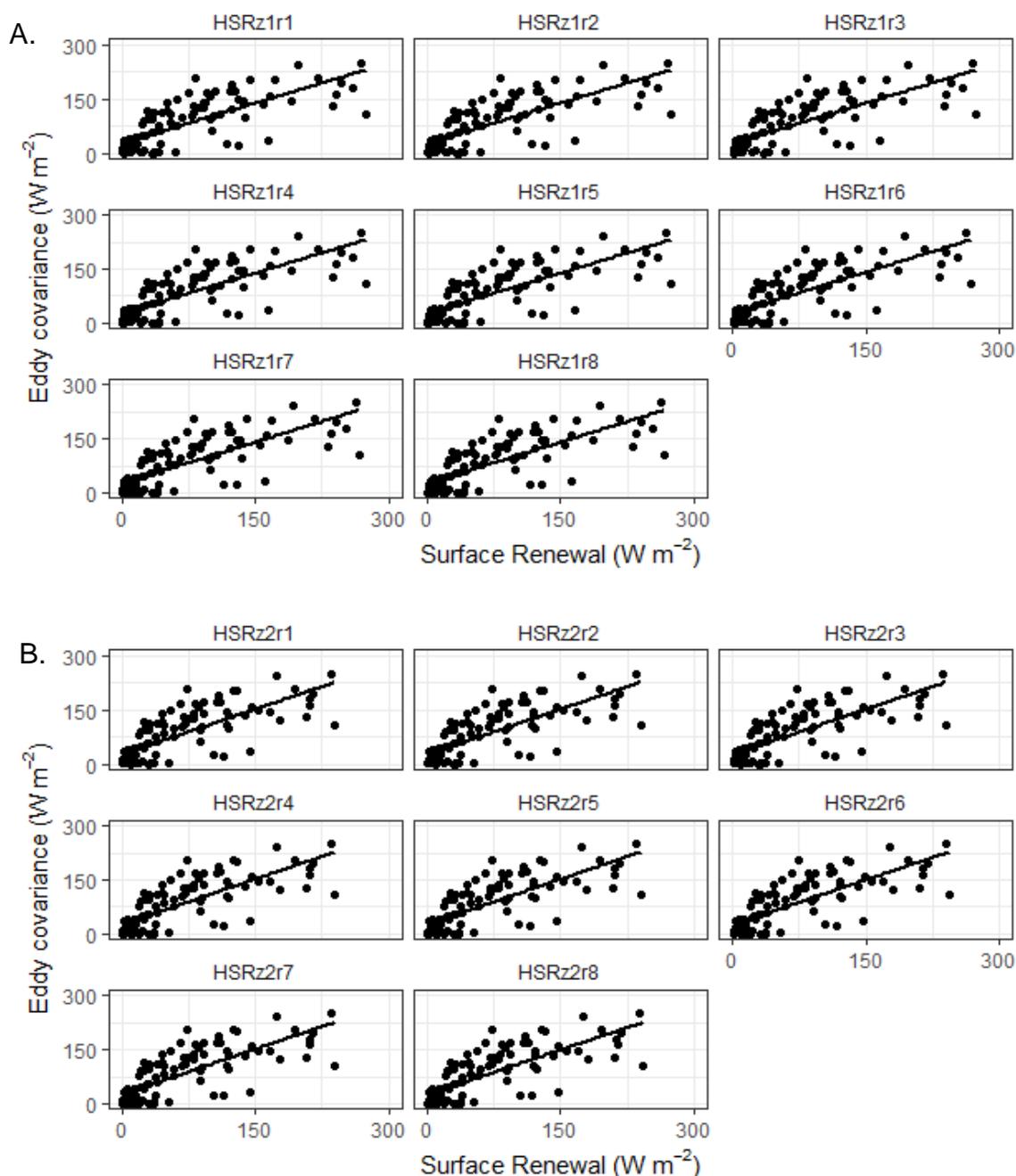


Figura 3. Eddy Covariance x Surface Renewal calibrado em diferentes tempos de retorno medidos pelo termopar 1 (A) e termopar 2 (B), medidos sob cultivo de lima ácida Tahiti nos dias de 16 a 23 de novembro de 2018.

Nota-se que com a calibração, todos os gráficos apresentaram comportamentos semelhantes, diminuindo a diferença que existia entre eles. Os valores de RMSE e MAE não calibrado e calibrado são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE) medidos entre fluxos de calor sensíveis estimados pelo método de surface renewal (não calibrado e calibrado) e método de eddy covariance durante a temporada de validação sob cultivo de lima ácida Tahiti nos dias de 16 a 22 de novembro de 2018

Variável	RMSE (Wm^{-2})		MAE (Wm^{-2})	
	NC	C	NC	C
HSR _{z1r1}	38,73154	37,35839	26,61352	25,478
HSR _{z1r2}	54,49933	37,32287	34,6941	25,46442
HSR _{z1r3}	61,77889	37,2851	38,28281	25,44971
HSR _{z1r4}	65,62538	37,25526	40,2243	25,43779
HSR _{z1r5}	67,98612	37,22616	41,42356	25,4259
HSR _{z1r6}	69,57949	36,96915	42,23216	25,34743
HSR _{z1r7}	70,72648	36,94183	42,81269	25,33584
HSR _{z1r8}	71,59134	36,91518	43,24965	25,32425
HSR _{z2r1}	61,82728	38,93993	38,14194	28,16009
HSR _{z2r2}	40,06821	38,93976	28,47263	28,15817
HSR _{z2r3}	48,3421	38,93991	32,63807	28,1633
HSR _{z2r4}	54,57504	38,94009	35,49935	28,16845
HSR _{z2r5}	58,74993	38,94048	37,42578	28,17358
HSR _{z2r6}	61,67439	38,92977	38,72236	28,18577
HSR _{z2r7}	63,82234	38,94156	39,64938	28,18386
HSR _{z2r8}	65,46228	38,93116	40,41629	28,1962

De acordo com a Tabela, 2 observa-se que as calibrações reduziram os valores de RMSE e MAE em todas as variáveis estudadas, sendo que todas apresentaram valores próximos após aplicação da calibração, evidenciando a eficácia dos modelos gerados.

Conforme observado na calibração, os valores de RMSE e MAE de HSR_{z2r1} foram superiores aos demais nos dados não calibrados, evidenciando que esse tempo de retorno para essa altura não seja recomendado, devido à imprecisão da leitura. As menores reduções de RMSE e MAE foram encontradas no HSR_{z1r1} e

HSR_{z2r2} , indicando que para as alturas de 0,4 m e 0,8 m, os tempos de retorno mais precisos são os de 0,25 s e 0,5s, respectivamente.

Observando todas as variáveis, percebe-se que a HSR_{z2r2} foi a que teve menores reduções de RSME e MAE dos dados não calibrados para os calibrados, indicando que, entre as variáveis estudadas neste trabalho, na altura 0,8 m e com o tempo de retorno de 0,5 s é situação mais indicada para aplicação do método de SR nas condições edafoclimáticas estudadas para a cultura da lima ácida Tahiti.

Com a finalidade de se verificar a eficácia do SR para estimar o calor latente pela Equação de balanço de energia (Equação 9), foram utilizados os resultados calibrados das variáveis HSR_{z1r1} e HSR_{z2r2} para estimar os valores de calor latente, sendo os resultados comparados ao calor latente obtido pela estação de eddy covariance.

Observa-se pela Figura 4 que o LESR estimado utilizando os valores calibrados para as variáveis HSR_{z1r1} e HSR_{z2r2} obteve uma relação próxima a reta de 1 para 1 com o calor latente adquirido pela estação de eddy covariance, com R^2 de 0,9724 e R^2 de 0,9778, respectivamente. Esses resultados se assemelham com os observados por Suvočarev et al. (2019) em uma comparação do LESR com LEEC, onde obtiveram um R^2 de 0,91 a 0,94 para algodão e um R^2 de 0,95 e 0,96 para arroz.

Esses resultados evidenciam a eficácia da utilização do H adquirido pela metodologia de SR para estimativa do LE, e consequentemente, determinação da evapotranspiração das culturas de forma direta.

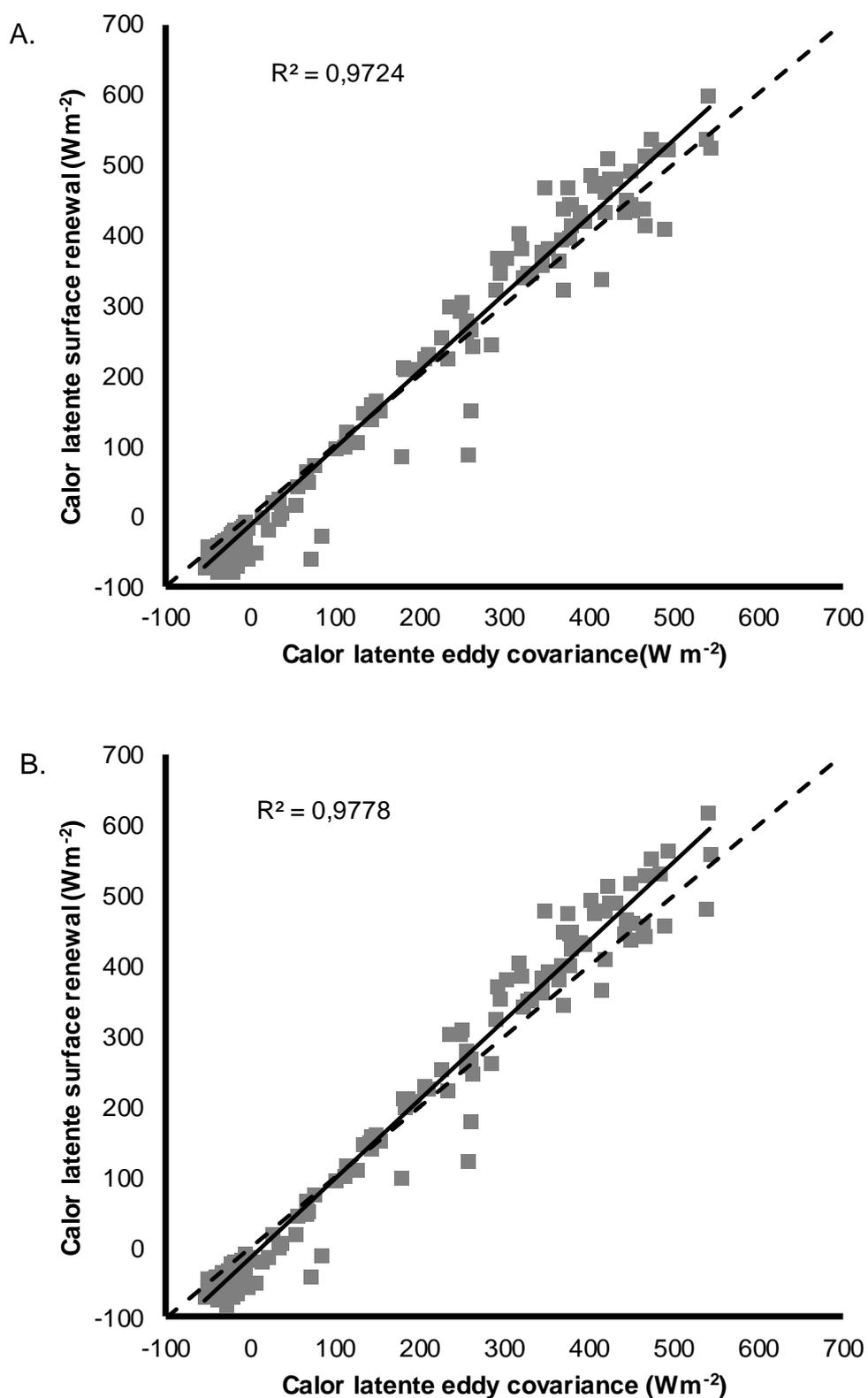


Figura 4. Correlação dos valores de calor latente obtidos pela estação de eddy covariance e o calor latente estimado pelas variáveis HSRz1r1 (A) e HSRz2r2 (B), medidos sob cultivo de lima ácida Tahiti nos dias de 16 a 22 de novembro de 2018.

CONCLUSÃO

A metodologia do surface renewal apresentou resultados satisfatórios quando comparado a valores obtidos pela eddy covariance para determinação do fluxo de calor sensível em cultivo de lima ácida Tahiti em regiões com característica edafoclimática semelhante às encontradas no cerrado mineiro, viabilizando assim seu uso como um método mais econômico e simples que o da eddy covariance.

Foi encontrado um fator de calibração para cada uma das 16 combinações de altura e tempo de retorno propostas neste trabalho. Os valores encontrados com 0,8m de altura apresentaram R^2 superiores e semelhantes nas faixas de tempo de retorno 0,25 s; 0,50 s; 0,75 s; 1,00 s; 1,25 s; e 1,75 s. Na altura de 0,4 m, os maiores valores de R^2 foram encontrados na faixa de tempo de retorno de 0,25 a 1,00 s, ressaltando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a utilização de tempos de retorno superiores a 1,0 s.

Na altura de 0,8 m, o tempo de retorno de 0,5 s foi o que apresentou os melhores resultados com um fator de calibração de 1,1487. Na altura de 0,4 m, o tempo de retorno mais indicado é o de 0,25 s com um fator de calibração de 1,313.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atta, G. A. V. (1977). Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Archives of Mechanics*, 29(1), 161-171.
- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (Eds.). (2012). *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer Science & Business Media.
- Castellvi, F. (2004). Combining surface renewal analysis and similarity theory: a new approach for estimating sensible heat flux. *Water resources research*, 40(5).
- Castellví F., Snyder, R. L. (2010). A comparison between latent heat fluxes over grass using a weighing lysimeter and surface renewal analysis. *Journal of hydrology*, 381(3-4), 213-220.

- Drexler, J. Z., Snyder, R. L., Spano, D., Paw U, K. T. (2004). A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes*, 18(11), 2071-2101.
- Echeverría, C. P., Sepúlveda-Reyes, D., Ortega-Farías, S. (2014). Effect of height and time lag on the estimation of sensible heat flux over a drip-irrigated vineyard using the surface renewal (SR) method across distinct phenological stages. *Agricultural Water Management*, 141, 74-83.
- French, A.N. , Alfieri, J.G. , Kustas, W.P. , Prueger, J.H. , Hipps, L.E. , Chavez Eguez, J.L. , Evett, S.R. , Howell, T.A. , Gowda, P. , Hunsaker, D.J. , Thorp, K.R. (2012). Estimation of surface energy fluxes using surface renewal and flux variance techniques over an advective irrigated agricultural site. *Advances in water resources*, 50, 91-105.
- Haymann, N., Lukyanov, V., Tanny, J. (2019). Effects of variable fetch and footprint on surface renewal measurements of sensible and latent heat fluxes in cotton. *Agricultural and forest meteorology*, 268, 63-73.
- Mekhmandarov, Y., Pirkner, M., Achiman, O., Tanny, J. (2015). Application of the surface renewal technique in two types of screenhouses: Sensible heat flux estimates and turbulence characteristics. *Agricultural and forest meteorology*, 203, 229-242.
- Paw U.K.T., Brunet Y. (1991). A surface renewal measure of sensible heat flux density. In preprints, *20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, September 10-13, 1991, Salt Lake City, Utah. American Meteorological Society, Boston, MA. p. 52-53.
- Paw U, K. T., Snyder, R. L., Spano, D., Su, H. B. (2005). Surface renewal estimates of scalar exchange. *Micrometeorology in agricultural systems*, 47, 455-483.
- Rodrigues, M. D. S., De Oliveira, E. R. M., Girardi, E. A., Ledo, C. D. S., Soares Filho, W. D. S. (2016). Produção de mudas de citros com diferentes combinações copa e porta-enxerto em viveiro protegido. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(1), 187-201.
- Rosa, R., Tanny, J. (2015). Surface renewal and eddy covariance measurements of sensible and latent heat fluxes of cotton during two growing seasons. *Biosystems Engineering*, 136, 149-161.

- Savage, M. J. (2017). Estimation of grass reference evaporation and sensible heat flux using surface renewal and Monin-Obukhov similarity theory: A simple implementation of an iterative method. *Journal of Hydrology*, 547, 742-754.
- Silva, G. H. D., Dias, S. H., Ferreira, L. B., Santos, J. É., Cunha, F. F. D. (2018). Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Jaíba, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 83-89.
- Snyder, R. L., Spano, D., Pawu, K. T. (1996). Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density. *Boundary-Layer Meteorology*, 77(3-4), 249-266.
- Snyder, R. L., O'Connell, N. V. (2007). Crop coefficients for microsprinkler-irrigated, clean-cultivated, mature citrus in an arid climate. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1), 43-52.
- Suvočarev, K., Shapland, T. M., Snyder, R. L., Martínez-Cob, A. (2014). Surface renewal performance to independently estimate sensible and latent heat fluxes in heterogeneous crop surfaces. *Journal of hydrology*, 509, 83-93.
- Suvočarev, K., Castellví F., Reba, M. L., Runkle, B. R. K. (2019). Surface renewal measurements of H, λE and CO₂ fluxes over two different agricultural systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107763.

3.3 DESENVOLVIMENTO DE PSICRÔMETROS ASPIRADOS COM SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS EM NUVEM

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a construção e calibração de psicrômetros com sistema de aquisição e armazenamento de dados em nuvem, utilizando componentes de baixo custo. Os psicrômetros foram desenvolvidos na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes, RJ. Foram produzidos dois psicrômetros de ventilação forçada conectados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados em nuvem. Para cada psicrômetro foi utilizado sensor de temperatura infravermelho MLX 90614, um minicooler de 12 V para aspirar o ar, um recipiente com água, uma placa de cerâmica porosa, e um frasco de Mariotte para exercer pressão negativa. A calibração foi realizada para as temperaturas de bulbo seco e úmido com auxílio de um psicrômetro aspirado de calibração e em seguida os dados ajustados foram utilizados para averiguar os resultados de déficit de pressão de vapor, umidade relativa, grau de saturação e volume específico. Os psicrômetros com leituras ajustadas apresentaram boas correlações com o psicrômetro aspirado em todas as averiguações com R^2 de 0,95, 0,90, 0,96 e 0,90 para as correlações de déficit de pressão de vapor, grau de saturação, volume específico e umidade relativa.

Palavras-chave: bulbo úmido, bulbo seco, umidade relativa, tubo de Mariotte.

DEVELOPMENT OF ASPIRATED PSYCHROMETERS WITH CLOUD DATA ACQUISITION AND STORAGE SYSTEM

ABSTRACT

The objective of this work was the construction and calibration of psychrometers with a data acquisition and storage system in the cloud, using low cost components. The psychrometers were developed at the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, in Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil. Two forced ventilation psychrometers were produced, connected to a cloud data acquisition and storage system. For each psychrometer, an MLX 90614 infrared temperature sensor was used, a 12-volt minicooler to suck in air, a container with water, a porous ceramic plate, and a Mariotte tube that exerted negative pressure. Calibration was performed for dry and wet bulb temperatures with the aid of an aspirated calibration psychrometer. Afterwards, the adjusted data were used to ascertain the results of vapor pressure deficit, relative humidity, degree of saturation and the specific volume. The psychrometers with adjusted readings showed good correlations with the aspirated psychrometer in all analyzes with an R^2 of 0.95, 0.90, 0.96 and 0.90 for the correlations of vapor pressure deficit, degree of saturation, specific volume and relative humidity.

Keywords: wet bulb, dry bulb, relative humidity, Mariotte tube.

INTRODUÇÃO

A umidade relativa é um importante fator presente na atmosfera, influenciando no bem-estar dos seres humanos, na agricultura e no armazenamento de produtos (Marin et al., 2001), sendo que um equipamento amplamente utilizado para determinar esse fator é o psicrômetro.

O psicrômetro consiste em um par de termômetros, em que um deles mede a temperatura do ar livremente, chamado de bulbo seco, e o outro é coberto com uma mecha de algodão umedecida e sua medida de temperatura depende da concentração de vapor na atmosfera (Ustymczuk e Giner, 2011; Cunha e Volpe, 2014). Geralmente, o psicrômetro se destaca por ser um equipamento de boa precisão (Silva et al., 2011), o que influenciou o desenvolvimento de vários modelos

de psicrômetros (Cunha et al., 2001; Marin et al., 2001, Turco et al., 2013; Silva et al., 2011; Cunha, 2013).

Existem algumas dificuldades no uso dos psicrômetros, e a principal é a medição do bulbo úmido, pois exige uma constante manutenção de um suprimento adequado de água, nem excessivo nem insuficiente. O excesso de umedecimento faz com que o termômetro indique a temperatura da água, e se umedecido insuficientemente, faz que as leituras de temperatura se aproximem do valor do bulbo seco (Ustymczuk e Giner, 2011). Outras dificuldades apresentadas em trabalhos são que a saturação da mecha de bulbo úmido deve ser contínua, a ventilação tem de ser constante e a possível contaminação da mecha de algodão que interfere na capilaridade (Cunha, 2013; Cunha e Volpe, 2014; Hoover e Yao, 2018).

Como alternativa, descreve-se neste trabalho a construção e calibração de psicrômetros com sistema de aquisição e armazenamento de dados em nuvem, utilizando componentes de baixo custo.

MATERIAL E MÉTODOS

O equipamento foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Agrícola, localizado no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ. Foram construídos dois psicrômetros de aspiração forçada, para obter temperaturas de bulbo seco e úmido.

Para a construção do psicrômetro foram utilizados sensores de temperatura infravermelho MLX 90614, um minicooler de 12 V para aspirar o ar, um recipiente com água, uma placa de cerâmica porosa, microtubos. Os psicrômetros foram feitos com estrutura em de tubos de PVC, sendo que uma extremidade é aberta para a saída de ar e na outra foi colocado um cooler que tem a finalidade de succio,nar o ar para dentro do psicrômetro.

Ao entrar no psicrômetro o ar succionado passa pelo sensor de temperatura e pela placa porosa úmida, sendo que a medida da temperatura de bulbo seco é realizada no corpo do sensor e a medida do bulbo úmido é realizada pela medição do resfriamento da placa porosa com a passagem de ar. Com o intuito de aumentar a velocidade do ar dentro do equipamento, para aproximadamente 3 m s^{-1} , foi

colocada uma barreira um pouco antes da placa porosa, diminuindo assim o diâmetro dentro da estrutura.

A reposição de água na placa porosa foi baseada no princípio do frasco de Mariotte (Buitrón, e Carvajal, 2010; Tonello et al., 2018). Para isso, necessitou de um frasco de Mariotte, feito com um reservatório de água e dois microtubos. O frasco de Mariotte foi colocado dentro do reservatório de água, com o cuidado de não existir vazamento nem troca de líquidos entre os dois. O primeiro microtubo foi posicionado com uma extremidade aberta para entrada de ar atmosférico e a outra inserida dentro da água presente no frasco de Mariotte com profundidade semelhante à largura da placa porosa. O segundo microtubo foi posicionado com uma extremidade aberta para o vácuo existente dentro do frasco de Mariotte e a outra inserida dentro da água do reservatório com abertura rente à placa porosa. A camada de vácuo presente no frasco de Mariotte gera uma pressão negativa que segura a água na placa porosa, evitando assim o escoamento descontrolado. Foram utilizadas caixas de isopor seladas para proteção dos psicrômetros contra intemperes, deixando exposta apenas as saídas dos tubos.

Junto com os psicrômetros, foi desenvolvido um controlador central com comunicação GPRS, utilizando uma placa de desenvolvimento modelo Arduino Pró-mini, um módulo de Micro SD, um módulo RTC DS-3231, um módulo GPRS SIM8000, dois módulos reguladores de tensão, conectores, resistores, jumps, uma placa fotovoltaica, um controlador de carga de painel solar automático de 10 A e 12 V, uma bateria de 7 A. O algoritmo de programação foi realizado utilizando o software aberto Arduino IDE™, sendo programado para realizar leituras dos dois psicrômetros. Ao todo foram investidos, aproximadamente, R\$ 1000,00 na compra de componentes necessários para o desenvolvimento dos psicrômetros e do sistema de aquisição de dados. Na Figura 1 é apresentado o esquema elétrico do controlador central.

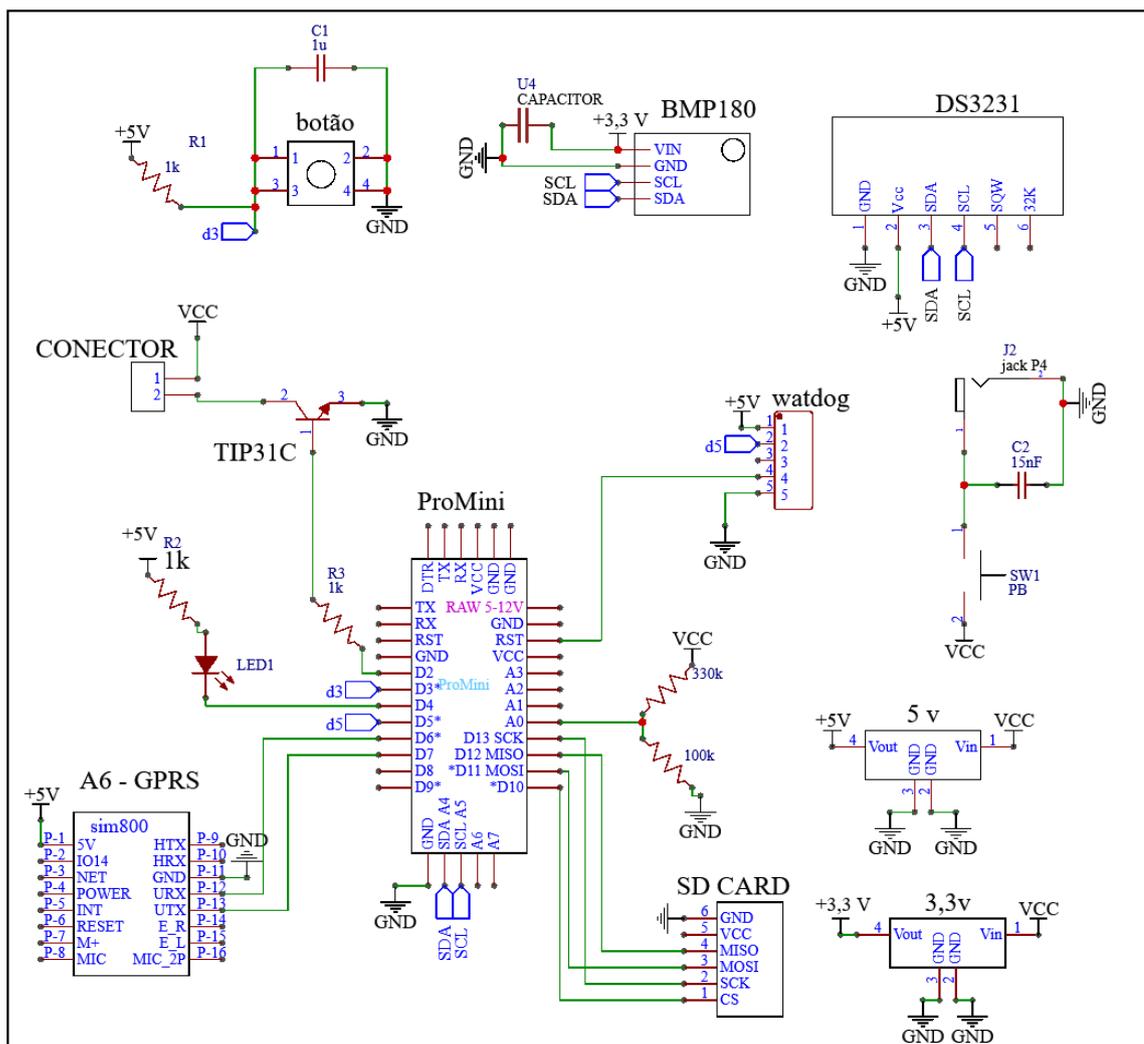


Figura 1. Esquema elétrico do controlador central dos psicrômetros.

Para calibração, foi utilizado um psicrômetro aspirado da marca LAMBRECHT, colocado lado a lado com os psicrômetros projetados. Essa calibração ocorreu no período de três dias, com o total de 30 medições de bulbo seco e bulbo úmido. Foi realizada a calibração para as medidas bulbo seco e bulbo úmido, e logo após, para analisar os resultados, foram aplicados o princípio e as equações psicrométricas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, apresentadas por ASHRAE (2001).

$$\ln(P_{vs}) = \frac{-5800,2206}{T} + 1,3914993 - 0,0486402390T + 4,1764768 \times 10^{-5} T^2 - 1,4452093 \times 10^{-8} T^3 + 6,5459673 \ln(T) \quad (1)$$

$$W_{s \text{ (bs ou bu)}} = 0,62198 \frac{P_{vs(vsbs \text{ ou } vsbu)}}{P - P_{vs(vsbs \text{ ou } vsbu)}} \quad (2)$$

$$W = \frac{[2501 - 2,381(T_{bu} - 273,16)] W_{sbu} - [1,00675 (T_{bs} - T_{bu})]}{2501 + 1,805 (T_{bs} - 273,16) - 4,186 (T_{bu} - 273,16)} \quad (3)$$

$$P_v = \frac{PW}{0,62198 + W} \quad (4)$$

$$v = \frac{R_a T}{P} (1 + 1,6078 W) \quad (5)$$

$$\mu = \frac{W}{W_{sbs}} \quad (6)$$

$$\Phi = \left[\frac{P_v}{P_{vs-T}} \right] \quad (7)$$

Em que P_{vs} é a pressão de vapor na condição de saturação (kPa), sendo que P_{vsbs} e P_{vsbu} são para bulbo seco e úmido; T é a temperatura (K), em que T_{bs} e T_{bu} são bulbo seco e úmido; W_s é a razão da mistura ($\text{kg}_v \text{kg}_{(ar \text{ seco})}^{-1}$), sendo que W_{sbs} e W_{sbu} são bulbo seco e úmido; P é a pressão atmosférica local em kPa; R_a é a constante universal dos gases perfeitos ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); P_v é a pressão de vapor (kPa); V é o volume específico ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$); μ é o grau de saturação em (%); e Φ é a umidade relativa (%).

RESULTADO E DISCUSSÃO

Na Figura 2 é apresentado o princípio de funcionamento dos psicrômetros desenvolvidos.

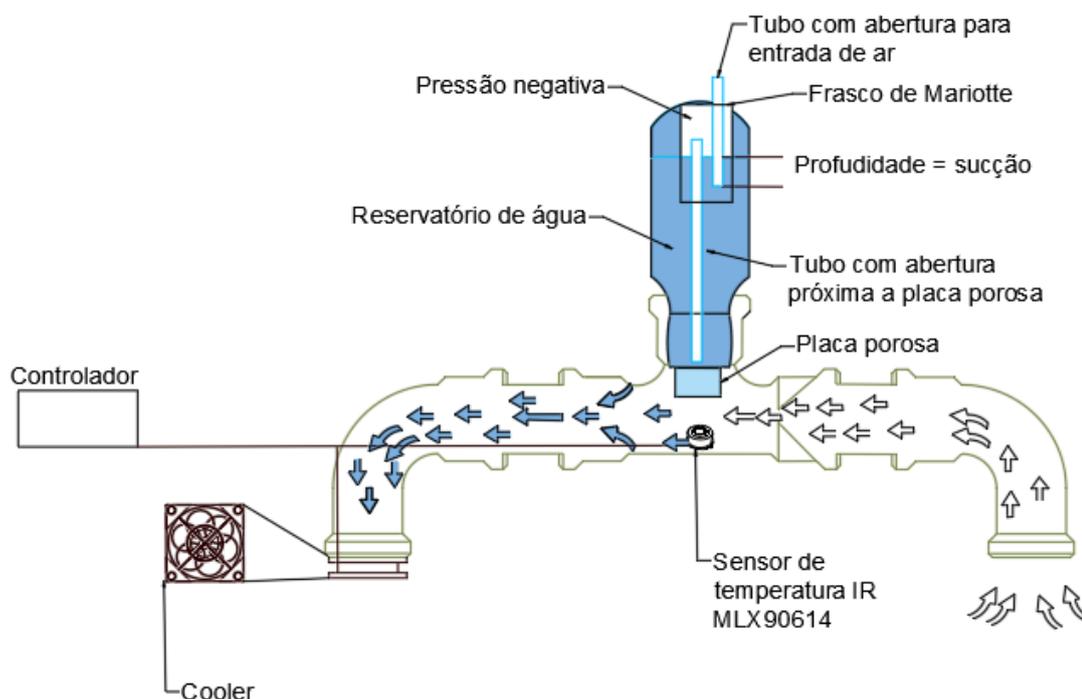


Figura 2. Esquema de funcionamento dos psicrômetros desenvolvidos.

Quando o ar aspirado para dentro do psicrômetro pelo cooler passa pela placa porosa, micropartículas de água são extraídas ocasionando o resfriamento da placa. Esse resfriamento é medido pelo sensor IR MLX90614 imediatamente, sendo essa a temperatura de bulbo úmido. A temperatura de bulbo seco é medida no corpo do sensor.

A leitura dos psicrômetros foi programada para ciclos de 3 minutos com um intervalo de tempo de 5 minutos entre o final de um ciclo e o início de outro. No primeiro minuto do ciclo só os coolers eram acionados, as leituras dos sensores MLX90614 iniciavam no segundo minuto até o terceiro. A leitura correspondente de cada ciclo era a média das leituras do período. Utilizou-se um chip de telefonia móvel com acesso à internet, para enviar as leituras para armazenamento em nuvem utilizando a plataforma analítica ThingSpeak™.

A Figura 3 apresenta o padrão de variação da temperatura de bulbos úmidos e seco de um dos psicrômetros desenvolvidos durante um dia de medição sem chuva.

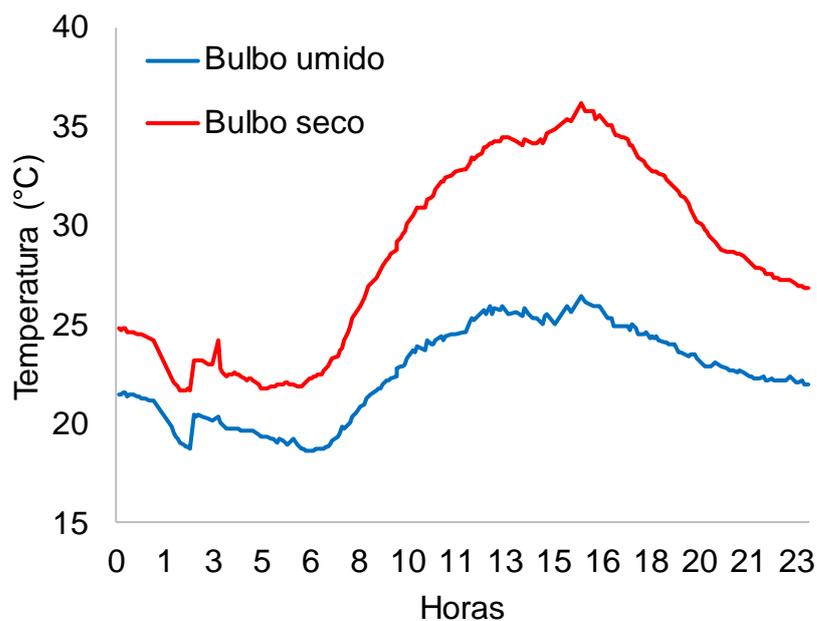


Figura 3. Valores de temperaturas de bulbos seco e úmido durante o período de 24 horas.

De acordo com a Figura 3, a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e úmido é maior nos períodos entre 9:00 h e 16:00 h. Coerente ao relatado por Hoover e Yao (2018) e com o comportamento do ar atmosférico ao longo do dia, devido principalmente à influência dos raios solares e da umidade relativa do ar.

Nas Figuras 4 A e 4 B são apresentados os resultados da calibração da temperatura de bulbo seco (T_{bs}) entre o psicrômetro aspirado e os psicrômetros A e B, respectivamente.

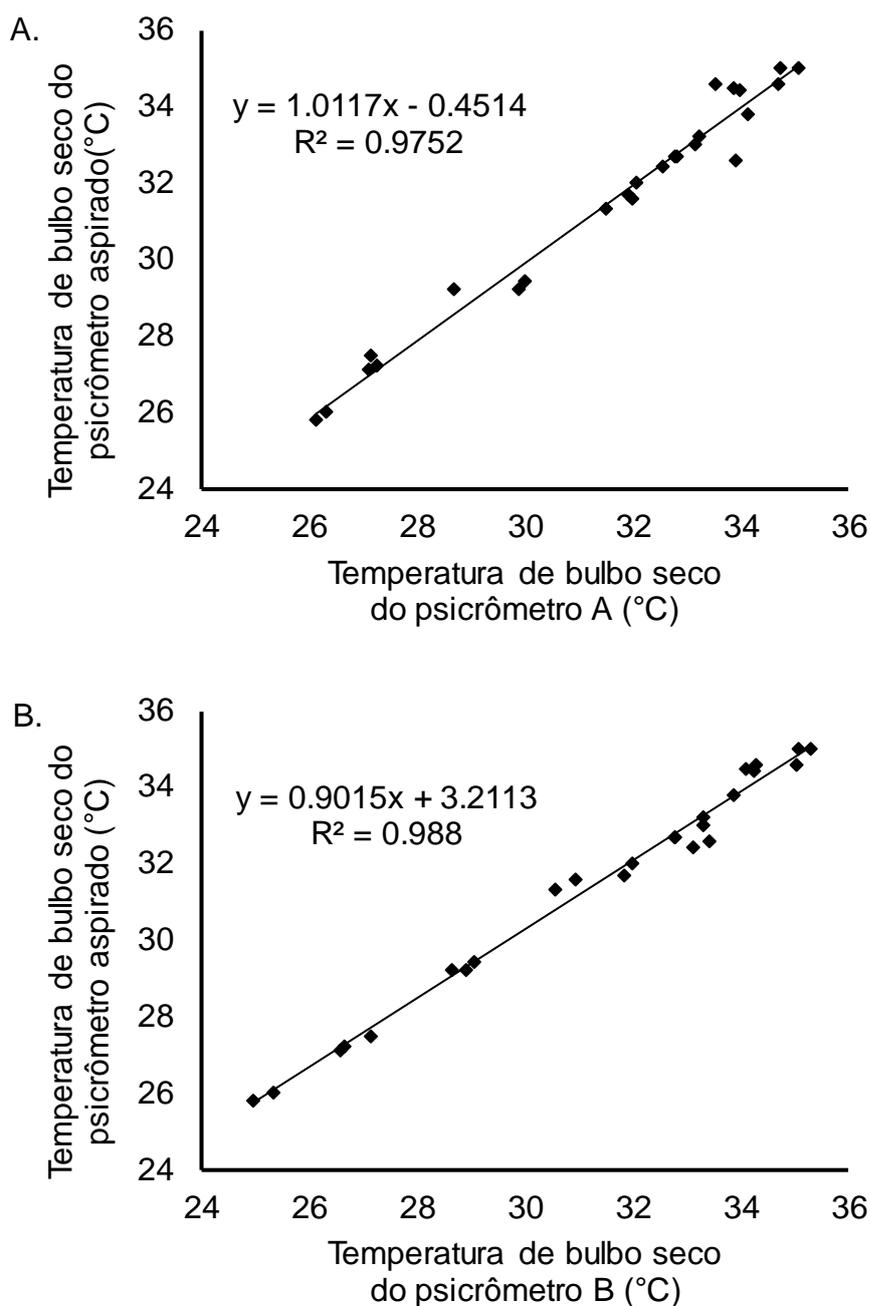


Figura 4. Calibração da temperatura de bulbo seco (Tbs) entre o psicrômetro aspirado e os psicrômetros A e B.

As leituras de Tbs foram semelhantes entre o psicrômetro aspirado e os dois psicrômetros desenvolvidos com o R^2 acima de 0,97 nas duas análises. Na tabela 1 são apresentados os resultados da análise dos coeficientes de duas regressões utilizadas.

Tabela 1. Análise das regressões de temperatura de bulbo seco

Regressão	Variável	Coefficiente	Valor-p
A	a	1,0117*	$5,818 \times 10^{-20}$
	b	-0,4514	0,6759
B	a	0,9015*	$1,33 \times 10^{-23}$
	b	3,2113*	$5,63 \times 10^{-5}$

*valor significativo em 0,01 pelo Teste t.

De acordo com a tabela 1 pode-se perceber que houve significância dos coeficientes nas duas regressões, sendo que o coeficiente b da regressão do psicrômetro A foi não significativo, ou seja, esse coeficiente não altera o resultado da regressão podendo ser retirado da mesma, o que resulta em um coeficiente “a” de aproximadamente 1. Esse fato demonstra que a leitura do sensor MLX90614 utilizado é coerente com o termômetro do psicrômetro aspirado, logo pode-se deduzir que é desnecessário realizar a calibração do sensor para estimativa do Tbs.

Nas Figuras 5 A e 5 B são apresentados os resultados da calibração da temperatura de bulbo úmido (Tbu) entre o psicrômetro aspirado e os psicrômetros A e B, respectivamente. As leituras de Tbu dos psicrômetros A e B apresentaram maior variação do que as leituras de Tbu do psicrômetro aspirado, o que acabou influenciando no resultado do R² entre 0,63-0,66. Esse valor é inferior ao encontrado para calibração de Tbu em outros trabalhos como Silva et al. (2011), Cunha (2013) e Cunha e Volpe (2014), porém esses autores utilizaram outros modelos de psicrômetros.

Uma explicação para a maior variação de temperatura do Tbu nos psicrômetros A e B é a maior sensibilidade que o sensor infravermelho apresenta em relação ao termômetro de bulbo úmido do psicrômetro aspirado, desse modo ele detecta o resfriamento da placa porosa mais rapidamente e com maior escala de variação. Outra possível explicação, pode ser atribuída à emissividade da placa porosa, pois conforme a umidade e a temperatura variam, as propriedades de emissividade tendem a variar (Curado et al., 2011).

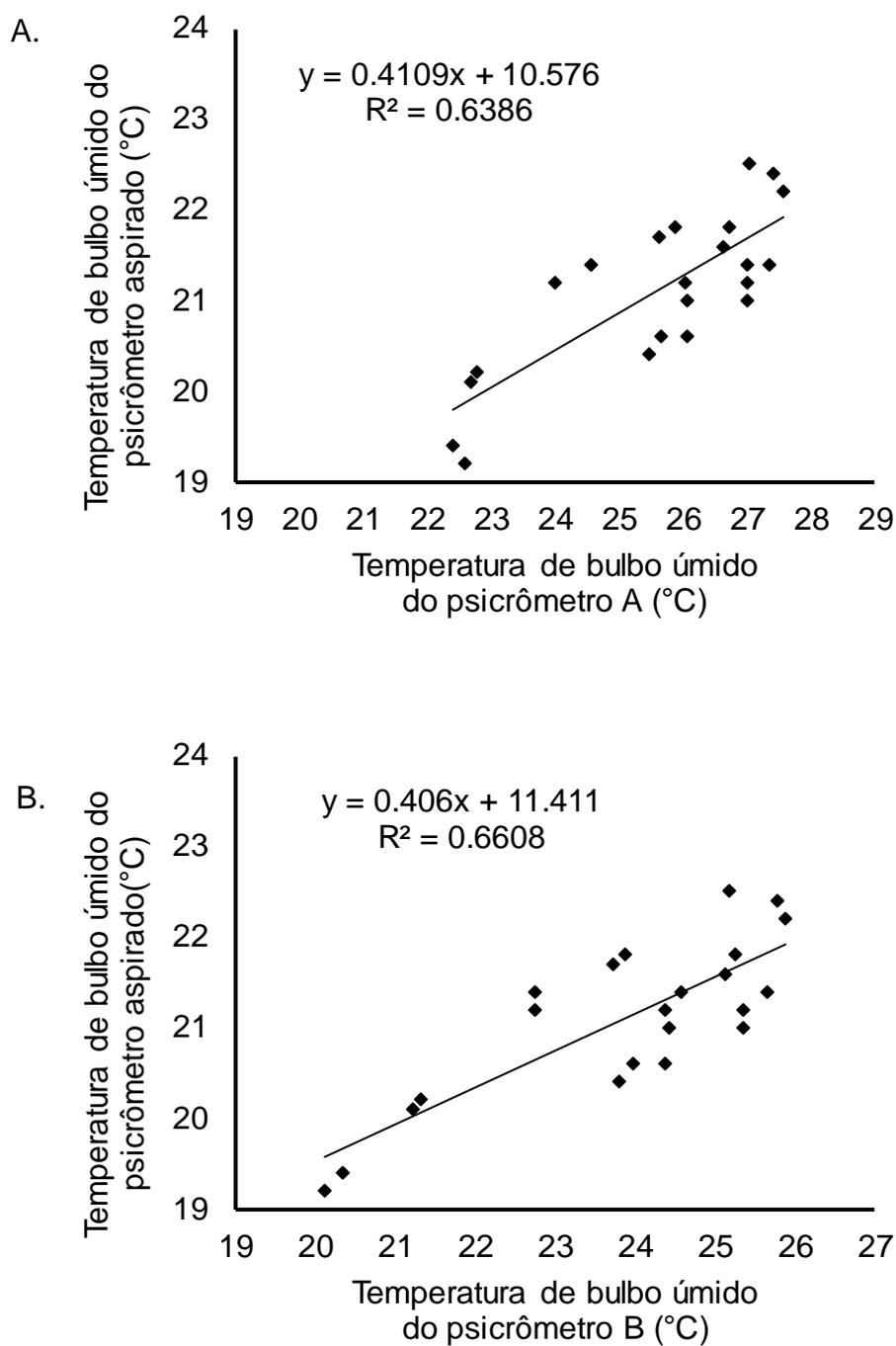


Figura 5. Calibração de temperatura de bulbo úmido (Tbu) entre o psicrômetro aspirado e os psicrômetros A e B.

Na tabela 2 são apresentados os resultados da análise dos coeficientes das duas regressões utilizadas para Tbu.

Tabela 2. Análise das regressões de temperatura de bulbo úmido

Regressão	Variável	Coeficiente	Valor-p	Limite a 95,0%	
				Inferior	Superior
A	a	0,4109*	$8,18 \times 10^{-6}$	0,26	0,55
	b	10,576*	$7,92 \times 10^{-6}$	6,87	14,27
B	a	0,406*	$4,28 \times 10^{-6}$	0,27	0,54
	b	11,411*	$4,39 \times 10^{-7}$	8,16	14,658

*valor significativo em 0,01 pelo Teste t.

De acordo com a tabela 2 percebe-se que, nas duas equações, todos os coeficientes foram significativos. Observa-se pelos intervalos de confiança das regressões, que os coeficientes a e b das duas regressões não diferem estatisticamente entre si. Deste modo, a utilização de apenas uma Equação atenderia a calibração de psicrômetros construídos na forma proposta neste trabalho.

Nas Figuras 6 A e 6 B são apresentados os gráficos de correlação do déficit de pressão de vapor (DPV) e do grau de saturação, respectivamente, entre as leituras do psicrômetro aspirado e dos psicrômetros A e B.

Os psicrômetros A e B apresentaram correlações de DPV e grau de saturação com R^2 de 0,95 e 0,90, respectivamente. Demonstrando que os psicrômetros construídos apresentam resultados satisfatórios para determinação dessas variáveis, sendo necessário apenas aplicar o modelo de calibração para ajustes dos valores de T_{bu} .

Nas Figuras 7 A e 7 B são apresentadas as correlações volume específico e umidade relativa, respectivamente, entre as leituras do psicrômetro aspirado e dos psicrômetros A e B. As correlações apresentadas na Figura 7 também foram satisfatórias, apresentado um R^2 de 0,96 e 0,90 para volume específico e umidade relativa, respectivamente. Em todas as correlações não houve diferença entre os psicrômetros A e B, evidenciando a necessidade da utilização de apenas um modelo de calibração do T_{bu} para os psicrômetros desenvolvidos.

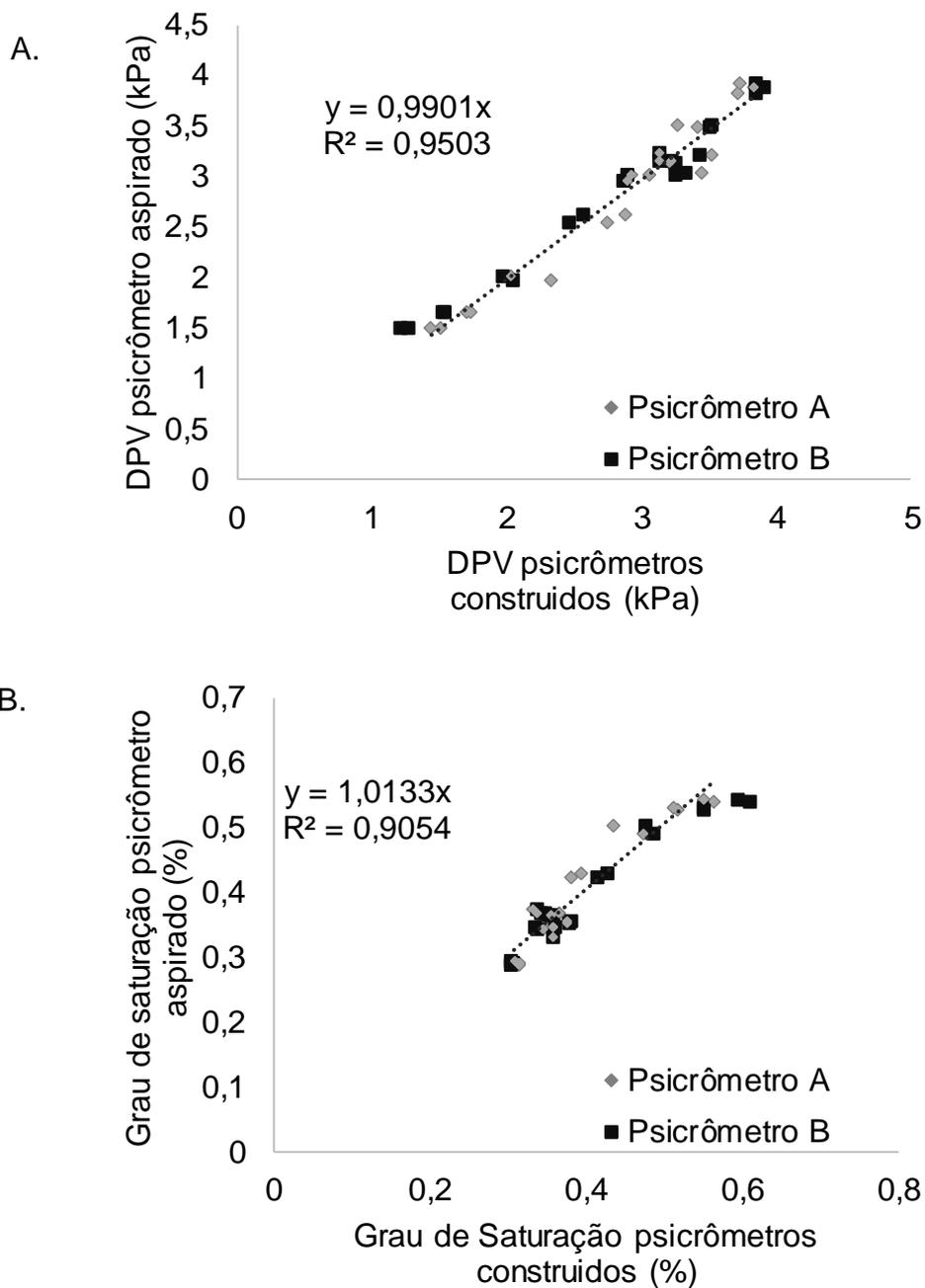


Figura 6. Correlação entre os valores de DPV (A) e grau de saturação (B) obtidos pelas leituras do psicrômetro aspirado e as leituras ajustadas dos psicrômetros construídos.

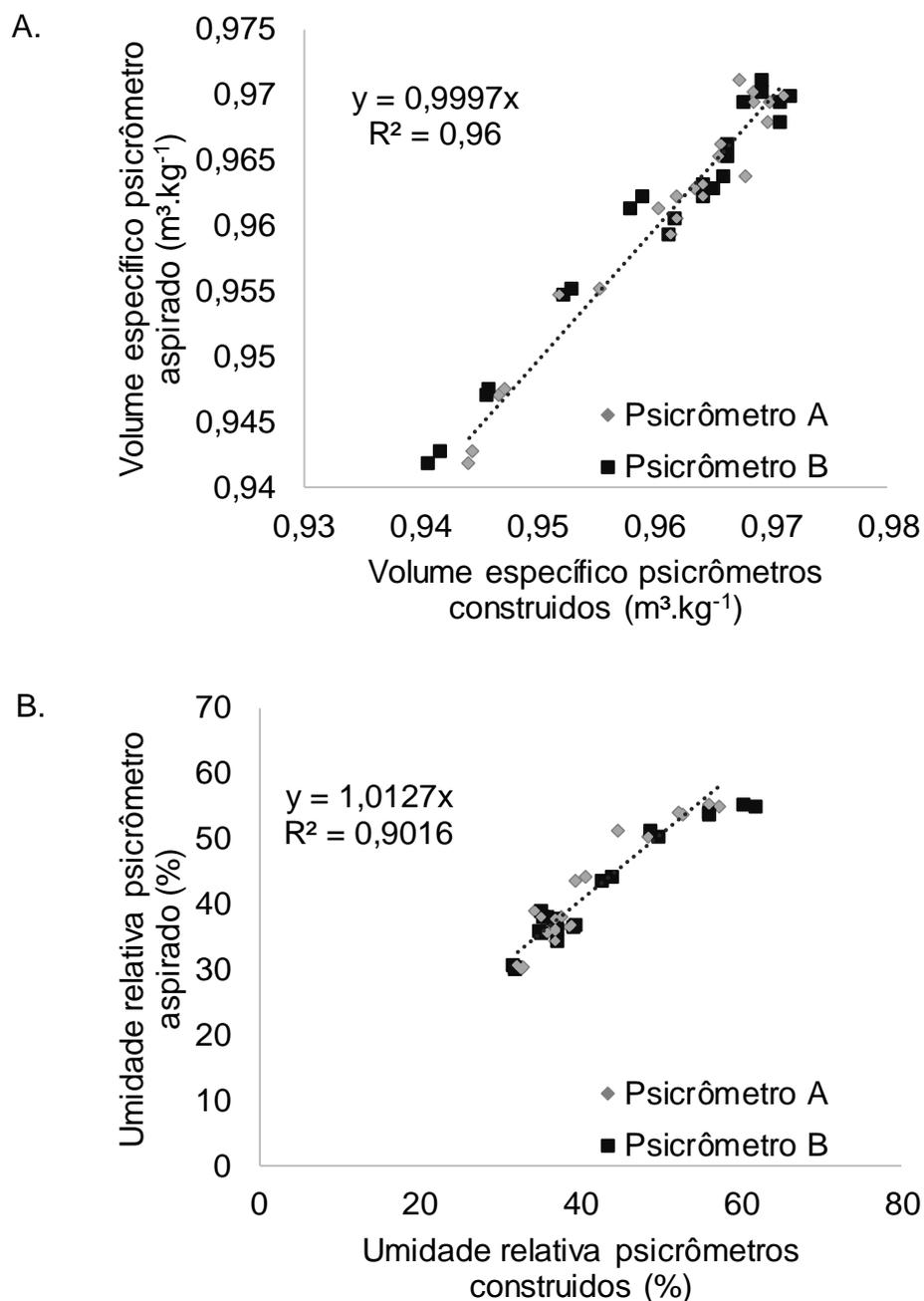


Figura 7. Correlação entre os valores volume específico (A) e umidade relativa (B), obtidos pelas leituras do psicrômetro aspirado e as leituras ajustadas dos psicrômetros construídos.

Cunha e Volpe (2014) desenvolveram um psicrômetro de ar forçado utilizando termopar em contato com mecha umedecida de algodão, e também foi constatada a eficiência da utilização do psicrômetro de ventilação forçada produzido, porém os autores notaram algumas medições inadequadas devido a necessidade da aspiração forçada do microventilador. Uma justificativa relatada por

Cunha (2013) foi que essas medições inadequadas são devidas às medidas de bulbo úmido ocasionadas por ventilação insuficiente na condução de calor advinda da atmosfera e/ou pela contaminação da mecha de algodão, o que dificulta a sua capilaridade. Essa é uma das diferenças entre o sistema proposto neste trabalho e os propostos encontrados na literatura, pois a utilização da reposição de água na placa porosa pelo tubo de Mariote aliada à força gravitacional, diminuiu a dependência do ar forçado para reposição de água na placa porosa.

Uma dificuldade no modelo proposto é encontrar o nível ideal no frasco de Mariotte, o que requer certa habilidade e conhecimento. Outra dificuldade para a total automatização do processo, é a necessidade de constante monitoramento do nível d'água do reservatório, fato também observado por Cunha (2013). Outro problema observado e também relatado por Hoover e Yao (2018) é que o ar forçado tende a diminuir a temperatura máxima e aumentar a temperatura mínima. Uma recomendação indicada por Pereira et al. (2017) e adotada neste trabalho foi a proteção dos bulbos secos e úmidos em abrigos de material termicamente isolado, desse modo os dados não são influenciados pela radiação solar direta e chuva (Burton, 2014).

Silva et al. (2011) desenvolveram um psicrômetro de ar forçado utilizando diferentes bitolas de termopares e constataram a eficiência e praticidade de utilização dos mesmos. Porém, eles utilizaram um sistema automático de aquisição de dados datalogger modelo CR10, Campbell Scientific, que embora seja eficiente, apresenta um custo muito mais elevado que o sistema de aquisição de dados proposto neste trabalho. Outra vantagem do sistema de aquisição de dados proposto é o armazenamento em nuvem, necessitando apenas de chip telefônico com sinal e com dados de internet.

CONCLUSÃO

Ao todo foram investidos, aproximadamente, R\$ 1000,00 na aquisição dos componentes para desenvolver os psicrômetros e o sistema de aquisição de dados.

Os psicrômetros apresentaram resultados satisfatórios, demonstrando a viabilidade de seu uso para medição umidade relativa, grau de saturação e volume específico do ar.

A utilização do princípio do frasco de Mariotte para manter a água na placa porosa, foi satisfatória, demonstrado ser uma alternativa a utilização da mecha de algodão em outros psicrômetros. Porém, existe a dificuldade de se encontrar o nível correto da água dentro do frasco de Mariotte para que se crie uma pressão negativa que diminua a influência da força gravitacional.

O sistema de aquisição e armazenamento de dados se mostrou bastante prático, possibilitando o acompanhamento em tempo real das leituras e em qualquer lugar com acesso à internet.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE. 2001. *2001 ASHRAE Handbook–Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Bowen, I. S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical review*, 27(6), 779.
- Buitrón, G., Carvajal, C. (2010). Biohydrogen production from Tequila vinasses in an anaerobic sequencing batch reactor: effect of initial substrate concentration, temperature and hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 101(23), 9071-9077.
- Burton, B. (2014). Stevenson screen temperatures—an investigation. *Weather*, 69(6), 156-160.
- Cunha, A. R., Escobedo, J. F., Galvani, E. (2001). Avaliação de um psicrômetro de termopar de baixo custo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9, 17-22.
- Cunha, A. R. D. (2013). Programação, conexão e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar de baixo custo em micrologger para estudos agrometeorológicos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), 221-232.
- Cunha, A. R. D., Volpe, C. A. (2014). Medidas automatizadas de psicrômetro de termopar aspirado versus não aspirado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 271-280.
- Curado, L. F. A., Rodrigues, T. R., Biudes, M. S., de Paulo, S. R., de Paulo, I. J. C., Souza Nogueira, J. (2011). Estimativa sazonal da emissividade atmosférica através da Equação de Brutsaert no norte do Pantanal Mato-grossense. *Ciência e Natura*, 33(2), 167-180.

- Euser, T., Luxemburg, W. M. J., Everson, C. S., Mengistu, M. G., Clulow, A. D., Bastiaanssen, W. G. M. (2014). A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), 2021-2032.
- Hoover, J., Yao, L. (2018). Aspirated and non-aspirated automatic weather station Stevenson screen intercomparison. *International Journal of Climatology*, 38(6), 2686-2700.
- Marin, F. R., Angelocci, L. R., Coelho Filho, M. A., Nova, V., Augusto, N. (2001). Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agricola*, 58(4), 839-844.
- Pereira, O. A., Novais, J. W. Z., de Souza, R. D., Biudes, M. S., Machado, N. G. (2017). Temperatura e Umidade Relativa do Ar por Psicrômetros de Ventilação Forçada. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, 21(3), 183-186.
- Silva, C. R., Raabe, J., DIAS, N. D. S., Da Silva, T. J. A., Dos Santos, R. A. (2011). Desempenho de diferentes bitolas de termopar em um psicrômetro aspirado de baixo custo. *Revista Caatinga*, 24(1), 99-103.
- Tonello, T. U., Andreani, C. L., Mari, A. G., Leite, L. C., Dos Santos, J. R. F., Didonet, L. S., Gomes, S. D. (2018) Produção de Biohidrogênio a partir de água residuária de fecularia em reator anaeróbico de batelada sequencial e biomassa imobilizada. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 7(3).
- Turco, J. E. P., Fernandes, E. J. (2003). Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. *Engenharia Agrícola*, 23(3), 468-476.
- Ustymczuk, A., Giner, S. A. (2011). Relative humidity errors when measuring dry and wet bulb temperatures. *Biosystems engineering*, 110(2), 106-111.
- Wilhelm, L. R., Dwayne A. S.r, Gerald H. B. *Psychrometrics. Chapter 9 in Food & Process Engineering Technology*. St. Joseph, Michigan: ASAE. © American Society of Agricultural Engineers, 213-257.

4. RESUMOS E CONCLUSÕES

Neste estudo buscou-se desenvolver equipamentos para a medição de parâmetros meteorológicos utilizando componentes de baixo custo. Os equipamentos foram criados de acordo com a metodologia específica, sendo que as metodologias abordadas foram do surface renewal, da eddy covariance e da psicrometria. No primeiro trabalho, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados desenvolvido para estimar o calor sensível utilizando os métodos de surface renewal e eddy covariance. Na análise de desempenho, conclui-se que o sistema de aquisição de dados teve resultados satisfatórios para a estimativa do calor sensível utilizando a metodologia de surface renewal, sendo uma alternativa de equipamento, de custo acessível, que pode ser replicado em outras áreas cultivadas. Ao utilizar os métodos da eddy covariance, o sistema apresentou bons resultados, porém teve a eficiência prejudicada devido à limitação do modelo de anemômetro utilizado.

No segundo trabalho, o equipamento desenvolvido anteriormente foi calibrado e validado sob um cultivo de lima ácida Tahiti aplicando a metodologia de surface renewal para estimativa de calor sensível. Para calibração adotou-se uma estação de eddy covariance comercial instalada na mesma área, sendo analisados oito tempos de retardo em duas diferentes alturas. E, conclui-se que a metodologia do surface renewal apresentou resultados satisfatórios quando comparado a valores obtidos pela eddy covariance para determinação do fluxo de calor sensível em cultivo de lima ácida Tahiti em regiões com características edafoclimáticas semelhantes às encontradas no cerrado mineiro.

Foram determinadas 16 equações, gerando um fator de calibração para cada combinação de altura e tempo de retorno, essas equações são demonstradas na Tabela 1 do item 3.2 deste trabalho. Os valores encontrados com 0,8 m altura apresentaram R^2 superiores e semelhantes nas faixas de tempo de retorno 0,25 s; 0,50 s; 0,75 s; 1,00 s; 1,25 s; e 1,75 s. Na altura de 0,4 m os maiores valores de R^2 foram encontrados na faixa de tempo de retorno de 0,25 a 1,00 s. Ressaltando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a utilização de tempos de retorno superiores a 1,0 s.

Na altura de 0,8 m, o tempo de retorno de 0,50 s foi o que apresentou os melhores resultados com um fator de calibração de 1,1487. Na altura de 0,4 m o tempo de retorno mais indicado é o de 0,25 s com um fator de calibração de 1,313.

No terceiro trabalho, foram desenvolvidos psicrômetros de aspiração forçada conectados a um sistema de aquisição e armazenamento dos dados em nuvem. A diferença desses psicrômetros para os encontrados na literatura é o frasco de Mariotte que repõe água a uma placa porosa, de forma que diminui um dos problemas encontrados por outros autores. Os psicrômetros projetados tiveram as temperaturas de bulbo seco e úmido calibradas com auxílio de um psicrômetro aspirado. Os psicrômetros apresentaram resultados satisfatórios, demonstrando a viabilidade de seu uso para medição de déficit de pressão de vapor, umidade relativa, grau de saturação e volume específico do ar. As equações de calibração são apresentadas nas figuras 4 e 5, e tabelas 1 e 2 do item 3.3.

A utilização do princípio do frasco de Mariotte para manter a água na placa porosa, foi satisfatória, demonstrando ser uma alternativa a utilização da mecha de algodão em outros psicrômetros. Mas, existe a dificuldade de se encontrar o nível correto da água dentro do frasco de Mariotte para que se crie uma pressão negativa que diminua a influência da força gravitacional. O sistema de aquisição e armazenamento de dados se mostrou bastante prático, possibilitando o acompanhamento em tempo real das leituras e em qualquer lugar com acesso à internet. Esse sistema facilita a automatização do equipamento e facilita a retirada dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Alves, E. M. (2015). *Fluxos de energia, vapor d'água e CO₂ entre a vegetação e a atmosfera no Agreste meridional de Pernambuco*. Tese (Doutorado Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 97p.
- Arruda, J., Jorge, A., Priante Filho, N., Nogueira, J., Almeida Filho, E. Q., Campelo Júnior, J. H., Vourlitis, G. (2006). Aplicação de três metodologias para estimar o fluxo de calor latente em floresta de transição. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21(3b), 21-28.
- ASHRAE. 2001. *2001 ASHRAE Handbook–Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Atta, G. A. V. (1977). Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Archives of Mechanics*, 29(1), 161-171.
- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (Eds.). (2012). *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer Science & Business Media.
- Barbosa, B. D. S., Oliveira, F. G., Figueiredo, F. P. (2015). Determinação do coeficiente de cultivo (Kc) do capim Tanzânia irrigado no norte de Minas Gerais. *IRRIGA*, 1(2), 11-20.

- Biudes, M. S., Campelo Júnior, J. H., Nogueira, J. D. S., Sanches, L. (2009). Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(2), 56-64.
- Bowen, I. S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical review*, 27(6), 779.
- Buitrón, G., Carvajal, C. (2010). Biohydrogen production from Tequila vinasses in an anaerobic sequencing batch reactor: effect of initial substrate concentration, temperature and hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 101(23), 9071-9077.
- Burba, G., Madsen, R., Feese, K. (2013). Eddy covariance method for CO₂ emission measurements in ccus applications: principles, instrumentation and software. *Energy Procedia*, 40, 329-336.
- Burton, B. (2014). Stevenson screen temperatures—an investigation. *Weather*, 69(6), 156-160.
- Cardoso, G. B., Viana, T. D. A., de Azevedo, B. M., de Sousa, V. F., Souza, F. D. (2005). Determinação da ET de referência pela razão de Bowen com psicrômetros instalados a diferentes alturas. *Revista Ciência Agronômica*, 36(1)16-23.
- Castellvi, F. (2004). Combining surface renewal analysis and similarity theory: a new approach for estimating sensible heat flux. *Water resources research*, 40(5).
- Castellví F., Snyder, R. L. (2010). A comparison between latent heat fluxes over grass using a weighing lysimeter and surface renewal analysis. *Journal of hydrology*, 381(3-4), 213-220.
- Cruz, F. A. (2005) *Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica-RJ*. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Seropédica-RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 56p.
- Cunha, A. R., Escobedo, J. F., Galvani, E. (2001). Avaliação de um psicrômetro de termopar de baixo custo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 9, 17-22.
- Cunha, A. R. D. (2013). Programação, conexão e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar de baixo custo em micrologger para estudos agrometeorológicos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(2), 221-232.

- Cunha, A. R. D., Volpe, C. A. (2014). Medidas automatizadas de psicrômetro de termopar aspirado versus não aspirado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 271-280.
- Curado, L. F. A., Rodrigues, T. R., Biudes, M. S., de Paulo, S. R., de Paulo, I. J. C., Souza Nogueira, J. (2011). Estimativa sazonal da emissividade atmosférica através da Equação de Brutsaert no norte do Pantanal Mato-grossense. *Ciência e Natura*, 33(2), 167-180.
- Da Silva, T. G., Zolnier, S., de Moura, M. S., de Souza, L. S. (2013). Sazonalidade do controle de evapotranspiração pela cana-de-açúcar irrigada e características aerodinâmicas da cultura no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(4), 621-634.
- Drexler, J. Z., Snyder, R. L., Spano, D., Paw U, K. T. (2004). A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes*, 18(11), 2071-2101.
- Echeverría, C. P., Sepúlveda-Reyes, D., Ortega-Farías, S. (2014). Effect of height and time lag on the estimation of sensible heat flux over a drip-irrigated vineyard using the surface renewal (SR) method across distinct phenological stages. *Agricultural Water Management*, 141, 74-83.
- Escobar, L. F. (2008). Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do planalto médio do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Santa Maria - RS, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 104p.
- Esteves, B. S., De Sousa, E. F., Mendonça, J. C., de Lima Lousada, L., Marciano, C. R., Siqueira, D. P. (2014). Coeficiente de cultivo da cana-de-açúcar utilizando a razão de Bowen. *Irriga*, 19(3), 441-452.
- Euser, T., Luxemburg, W. M. J., Everson, C. S., Mengistu, M. G., Clulow, A. D., Bastiaanssen, W. G. M. (2014). A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), 2021-2032.
- French, A.N. , Alfieri, J.G. , Kustas, W.P. , Prueger, J.H. , Hipps, L.E. , Chavez Eiguez, J.L. , Evett, S.R. , Howell, T.A. , Gowda, P. , Hunsaker, D.J. , Thorp, K.R. (2012). Estimation of surface energy fluxes using surface renewal and flux variance techniques over an advective irrigated agricultural site. *Advances in water resources*, 50, 91-105.

- Haymann, N., Lukyanov, V., Tanny, J. (2019). Effects of variable fetch and footprint on surface renewal measurements of sensible and latent heat fluxes in cotton. *Agricultural and forest meteorology*, 268, 63-73.
- Hoover, J., Yao, L. (2018). Aspirated and non-aspirated automatic weather station Stevenson screen intercomparison. *International Journal of Climatology*, 38(6), 2686-2700.
- Hu, Y., Buttar, N. A., Tanny, J., Snyder, R. L., Savage, M. J., Lakhari, I. A. (2018). Surface Renewal Application for Estimating Evapotranspiration: A Review. *Advances in Meteorology*, 2018.
- Jordão, M. D., Paiva, K. D., Firmo, H. T., Inácio, C. T., Rotunno Filho, O. C. (2017). Low-cost automatic station for compost temperature monitoring. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 21(11), 809-813.
- Lecina, S., Martínez-Cob, A., Pérez, P. J., Villalobos, F. J., Baselga, J. J. (2003). Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman–Monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 60(3), 181-198.
- Lima, J. R. S. (2004) *Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do brejo paraibano*, (Doutorado) – Recife-PE. Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, 167p.
- Lopes, O. D., Kobayashi, M. K., Oliveira, F. G., Alvarenga, I. C., Martins, E. R., Corsato, C. E. (2011). Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(6), 548-553.
- Kar, G., Kumar, A., Martha, M. (2007). Water use efficiency and crop coefficients of dry season oilseed crops. *Agricultural water management*, 87(1), 73-82.
- Kjaersgaard, J. H., Cuenca, R. H., Plauborg, F. L., Hansen, S. (2007). Long-term comparisons of net radiation calculation schemes. *Boundary-Layer Meteorology*, 123(3), 417-431.
- Marin, F. R., Angelocci, L. R., Coelho Filho, M. A., Nova, V., Augusto, N. (2001). Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agrícola*, 58(4), 839-844.
- Mantovani, E.C., Bernardo, S., Palaretti, L.F. (2007) *Irrigação - Princípios e Métodos*. 2.ed. Viçosa: UFV, 72 p.

- Matzenauer, R., Bergamaschi, H., Berlatto, M. A. (1998). Evapotranspiração da cultura do milho. II-Relações com a evaporação do tanque classe "A", com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global, em três épocas de semeadura. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6(1), 15-21.
- McElrone, A. J., Shapland, T. M., Calderon, A., Fitzmaurice, L., Snyder, R. L. (2013). Surface renewal: an advanced micrometeorological method for measuring and processing field-scale energy flux density data. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (82), e50666.
- Mekhmandarov, Y., Pirkner, M., Achiman, O., Tanny, J. (2015). Application of the surface renewal technique in two types of screenhouses: Sensible heat flux estimates and turbulence characteristics. *Agricultural and forest meteorology*, 203, 229-242.
- Moratiel, R., Martínez-Cob, A. (2013). Evapotranspiration and crop coefficients of rice (*Oryza sativa* L.) under sprinkler irrigation in a semiarid climate determined by the surface renewal method. *Irrigation science*, 31(3), 411-422.
- Paw U.K.T., Brunet Y. (1991). A surface renewal measure of sensible heat flux density. In preprints, *20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, September 10-13, 1991, Salt Lake City, Utah. American Meteorological Society, Boston, MA. p. 52-53.
- Paw U, K. T., Snyder, R. L., Spano, D., Su, H. B. (2005). Surface renewal estimates of scalar exchange. *Micrometeorology in agricultural systems*, 47, 455-483.
- Pereira, O. A. (2009) *Determinação do fluxo de CO2 numa área monodominante de Cambará no Norte do Pantanal Mato-grossense*. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Cuiabá-MT. Universidade Federal de Mato Grosso, 59p.
- Pereira, O. A., Novais, J. W. Z., de Souza, R. D., Biudes, M. S., Machado, N. G. (2017). Temperatura e Umidade Relativa do Ar por Psicrômetros de Ventilação Forçada. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, 21(3), 183-186.
- Perez, P. J., Castellvi, F., Ibanez, M., Rosell, J. I. (1999). Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(3), 141-150.
- Rana, G., Katerji, N. (2000). Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of agronomy*, 13(2-3), 125-153.

- Rodrigues, M. D. S., De Oliveira, E. R. M., Girardi, E. A., Ledo, C. D. S., Soares Filho, W. D. S. (2016). Produção de mudas de citros com diferentes combinações copa e porta-enxerto em viveiro protegido. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(1), 187-201.
- Rosa, R. (2012). *Application of the Surface Renewal Technique for Evapotranspiration Estimates of Field Crops*. Hebrew University of Jerusalem.
- Rosa, R., Tanny, J. (2015). Surface renewal and eddy covariance measurements of sensible and latent heat fluxes of cotton during two growing seasons. *Biosystems Engineering*, 136, 149-161.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., Verma, S. B. (1983) *Microclimate: The Biological Environment*. 2nd Ed. Lincon, Nebraska, 495p.
- Santos, T. V. (2009) *Fluxos de calor na superfície e evapotranspiração diária em áreas agrícolas e de vegetação nativa na bacia do Jacuí por meio de imagens orbitais*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Porto Alegre -RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 96p.
- Savage, M. J. (2017). Estimation of grass reference evaporation and sensible heat flux using surface renewal and Monin-Obukhov similarity theory: A simple implementation of an iterative method. *Journal of Hydrology*, 547, 742-754.
- Silva, C. R., Alves Junior, J., Silva, T. J. A., Folegatti, M. V., Campeche, L. F. S. M. (2006). Variação sazonal na evapotranspiração de plantas jovens de **lima ácida** 'Tahiti'. *Irriga*, 11(1), 26-35.
- Silva, C. R., Raabe, J., DIAS, N. D. S., Da Silva, T. J. A., Dos Santos, R. A. (2011). Desempenho de diferentes bitolas de termopar em um psicrômetro aspirado de baixo custo. *Revista Caatinga*, 24(1), 99-103.
- Silva, G. H. D., Dias, S. H., Ferreira, L. B., Santos, J. É., Cunha, F. F. D. (2018). Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Jaíba, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 83-89.
- Silva, L. D., Folegatti, M. V., Nova, N. A. V., Nilson, A. (2005). Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola*, 25(3), 705-712.
- Silva, R. B. D., Leal, L. D. S., Alves, L. S., Brandão, R. V., Alves, R. D. C. M., Klering, E. V., Pezzi, R. P. (2015). Estações meteorológicas de código aberto: Um projeto

- de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(1), 1505.
- Silva, T. G., de Moura, M. S., Zolnier, S., Soares, J. M., Vieira, V. J. D. S., Gomes Jr, W. F. (2011). Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(12), 1257-1265.
- Silva, T. J., Folegatti, M. V., Silva, C. R., Júnior, A. J., Bonfim-Silva, E. M. (2007). Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. *Engenharia Agrícola*, 27(2), 392-403.
- Silva, V. D. P. R., Borges, C. J. R., Albuquerque, W. G. (2014). Necessidades hídricas da cana-de-açúcar cultivada em clima tropical. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(2), 625-632.
- Silva, V. D. P., Garcêz, S. L., da Silva, B. B., de Albuquerque, M. F., Almeida, R. S.. (2015). Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(5), 411-417.
- Snyder, R. L., Spano, D., Pawu, K. T. (1996). Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density. *Boundary-Layer Meteorology*, 77(3-4), 249-266.
- Snyder, R. L., O'Connell, N. V. (2007). Crop coefficients for microsprinkler-irrigated, clean-cultivated, mature citrus in an arid climate. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1), 43-52.
- Sousa Lima, J. R., Antonino, A. C. D., de Oliveira Lira, C. A. B., de Souza, E. S., da Silva, I. D. F. (2011). Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica*, 42(1), 65-74.
- Spano, D., Duce, P., Snyder, R.L., Paw U, K.T., Ferreira, M.I (2000). Estimating tree and vine evapotranspiration with emphasis on surface renewal. *Acta Horticulturae*, 537 (1), 37-43.
- Suvočarev, K., Shapland, T. M., Snyder, R. L., Martínez-Cob, A. (2014). Surface renewal performance to independently estimate sensible and latent heat fluxes in heterogeneous crop surfaces. *Journal of hydrology*, 509, 83-93.
- Suvočarev, K., Castellví F., Reba, M. L., Runkle, B. R. K. (2019). Surface renewal measurements of H, λE and CO₂ fluxes over two different agricultural systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107763.

- Tonello, T. U., Andreani, C. L., Mari, A. G., Leite, L. C., Dos Santos, J. R. F., Didonet, L. S., Gomes, S. D. (2018) Produção de Biohidrogênio a partir de água residuária de fecularia em reator anaeróbio de batelada sequencial e biomassa imobilizada. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 7(3).
- Turco, J. E. P., Fernandes, E. J. (2003). Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. *Engenharia Agrícola*, 23(3), 468-476.
- Twine, T.E., Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesely, M. L.. (2000). Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3), 279-300.
- Ustymczuk, A., Giner, S. A. (2011). Relative humidity errors when measuring dry and wet bulb temperatures. *Biosystems engineering*, 110(2), 106-111.
- Viana, T.V.A. (2000). *Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e um lisímetro de pesagem em ambiente protegido*. Tese (Doutorado)– Piracicaba-SP, Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo- USP, 138p.
- Villalobos, F. J. (1996). Surface renewal method of measuring evapotranspiration. *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, ASAE/IA/ICID, San Antonio, X*,3-6.
- Villela, S. M., Mattos, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw - Hill do Brasil, 1975.
- Wilhelm, L. R., Dwayne A. S.r, Gerald H. B. *Psychrometrics. Chapter 9 in Food & Process Engineering Technology*. St. Joseph, Michigan: ASAE. © American Society of Agricultural Engineers, 213-257.
- Zapata, N., Martínez-Cob, A. (2002). Evaluation of the surface renewal method to estimate wheat evapotranspiration. *Agricultural water management*, 55(2),141-157.
- Zhang, B., Kang,S,, Li, F., Zhang, L. (2008). Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10), 1629-1640.