

DAVI BOEHRINGER

**DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR
POR MÉTODOS TÉRMICOS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS — BRASIL
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B671d
2010

Boehringer, Davi, 1982-

Determinação da transpiração da cana-de-açúcar por
métodos térmicos / Davi Boehringer. – Viçosa, MG, 2010.
xv, 97f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Sérgio Zolnier.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 92-97

1. Evapotranspiração. 2. Cana-de-açúcar - Fatores
climáticos. 3. Cana-de-açúcar -passa Necessidades de água.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

DAVI BOEHRINGER

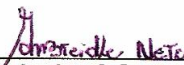
**DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR
POR MÉTODOS TÉRMICOS**

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

APROVADA: 28 de julho de 2010.



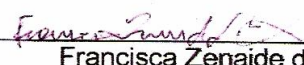
Aristides Ribeiro
(Coorientador)



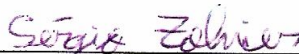
Antonio José Steidle Neto
(Coorientador)



José Antônio Saraiva Grossi



Francisca Zenaide de Lima



Sérgio Zolnier
(Orientador)

À minha família, pelo amor, pelo carinho,
pelo apoio, pela dedicação e pelos ensinamentos
que moldaram o meu caráter.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e por me guiar, dando-me sabedoria para tomar as decisões certas e que caminho seguir, protegendo-me em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por ter-me concedido a bolsa de estudo durante a realização deste Curso.

Ao professor Sérgio Zolnier pelos ensinamentos, pela dedicação, competência e constante orientação durante o trabalho.

Aos professores Aristides Ribeiro e Antonio José Steidle Neto, pela dedicação e pelas sugestões apresentadas.

Aos colegas Thieres e Roberto, pelo companheirismo, pelas sugestões e pelo auxílio no decorrer da pesquisa.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, Geraldo e José Geraldo, pelo auxílio na condução do experimento.

Aos meus amigos, que proporcionaram-me momentos agradáveis e contribuíram para a boa adaptação em Viçosa.

BIOGRAFIA

DAVI BOEHRINGER, filho de Siegmur Boehringer e Marli Waldow Boehringer, nasceu em 24 de fevereiro de 1982, na cidade de Tuparendi, RS.

Em 2000, iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria, RS, graduando-se em dezembro de 2004.

Em agosto de 2008, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa da dissertação em 28 de julho de 2010.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo principal.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1 A cultura da cana-de-açúcar	5
3.2 Transpiração vegetal	7
3.3 Fluxo de seiva.....	9
3.3.1 Método do balanço de energia	11
3.3.2 Método do pulso de calor	12
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1 Procedimentos experimentais	16
4.2 Sistema de aquisição de dados	20
4.3 Método do balanço de energia.....	23
4.4 Método do pulso de calor.....	26
4.5 Análise estatística.....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1 Sistema de aquisição de dados	29
5.2 Método do balanço de energia.....	30
5.2.1 Condições de céu parcialmente nublado	30
5.2.2 Condições de céu nublado	35
5.2.3 Condições de severas alterações na nebulosidade.....	40
5.2.4 Relação entre transpiração e fluxo de seiva.....	44
5.2.5 Velocidade do fluxo de seiva na cana-de-açúcar	49
5.3 Método do pulso de calor.....	51
6. CONCLUSÕES.....	56
7. ANEXOS.....	58
7.1 Procedimentos experimentais para instalação do sistema de medição do fluxo de seiva	58
7.2 Código fonte do programa computacional (plataforma C++ Builder versão 6.0) para controle da potência elétrica aplicada nos terminais resistivos da fonte de calor e	

para aquisição de dados do ambiente de cultivo, temperatura da seiva e transpiração da cana-de-açúcar	64
REFERÊNCIAS	92

LISTA DE FIGURAS

	Página
4.1. Cultivo da cana-de-açúcar em substrato comercial acondicionado em vasos plásticos sob condições de casa de vegetação.	19
4.2. Detalhe do microtubo gotejador do sistema de irrigação e cobertura da superfície do substrato para minimizar a evaporação d'água.	19
4.3. Vista do sistema de medição da radiação solar global incidente, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, instalado na estrutura em PVC, no interior da casa de vegetação.	21
4.4. Sistemas individuais de pesagem para medição da transpiração e do fluxo de seiva da cana-de-açúcar, instalados sob vasos de cultivo no interior da casa de vegetação	23
4.5. Posicionamento dos termopares em um colmo de cana-de-açúcar para implementação do método de balanço de energia. Os termopares foram inseridos no centro (1 e 2) e na superfície do colmo (3 e 4) e, adicionalmente, no centro da manta de isolamento térmico (5).	26
5.1. Tela de apresentação do programa computacional de aquisição de dados e controle da potência elétrica.	29
5.2. Variações típicas da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) sob condições de céu parcialmente nublado em Viçosa-MG, no dia 21 de outubro de 2009 e no interior de uma casa de vegetação não climatizada.	31
5.3. Transpiração horária da cana-de-açúcar em condições de céu parcialmente nublado no dia 21 de outubro de 2009.	31
5.4. Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar, medidas a 1,5 cm acima (T_{sa}) e abaixo (T_{sx}) da fonte de aquecimento, e do centro da manta de isolamento térmico (T_{cm}) posicionada ao nível da fonte de aquecimento. As medições foram realizadas no dia 21 de outubro de 2009 no interior de uma casa de vegetação não climatizada.	33
5.5. Variação horária dos componentes do balanço de calor em um segmento de caule da cana-de-açúcar sob condições de céu parcialmente nublado no dia 21 de outubro de 2009.	35
5.6. Variações típicas da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) sob	37

condições de céu nublado em Viçosa-MG, no dia 22 de outubro de 2009 e no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

- 5.7.** Transpiração horária da cana-de-açúcar em condições de céu nublado no dia 22 de outubro de 2009. 37
- 5.8.** Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar medidas acima (T_{sa}) e abaixo (T_{sx}) da fonte de aquecimento, e do centro da manta de isolamento térmico (T_{cm}). As medições foram realizadas no dia 22 de outubro de 2009, no interior de uma casa de vegetação não climatizada. 39
- 5.9.** Variação horária dos componentes do balanço de energia em um segmento de caule de cana-de-açúcar sob condições de céu nublado no dia 22 de outubro de 2009. 39
- 5.10.** Variações da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) sob alterações severas das condições de nebulosidade em Viçosa-MG, no dia 30 de outubro de 2009 e no interior de uma casa de vegetação não climatizada. 41
- 5.11.** Transpiração horária da cana-de-açúcar sob alterações severas das condições de nebulosidade no dia 30 de outubro de 2009. As setas indicam medições do fluxo de seiva acentuadamente acima e abaixo da transpiração determinada pelo método gravimétrico. 42
- 5.12.** Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar, medidas acima (T_{sa}) e abaixo (T_{sx}) da fonte de aquecimento, e do centro da manta de isolamento térmico (T_{cm}). As medições foram realizadas no dia 30 de outubro de 2009, no interior de uma casa de vegetação não climatizada. 42
- 5.13.** Variação horária dos componentes do balanço de energia em um segmento de caule de cana-de-açúcar sob alterações severas das condições de nebulosidade no dia 30 de outubro de 2009. 43
- 5.14.** Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar, referentes a medições realizadas em quatro dias nublados. 46
- 5.15.** Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar, referentes a medições realizadas em quatro dias parcialmente nublados. 47

- 5.16.** Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar em escala horária, referentes a medições realizadas em dias nublados e parcialmente nublados. 47
- 5.17.** Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar em escala diária, referentes a medições realizadas em dias nublados e parcialmente nublados. 48
- 5.18.** Velocidade da seiva da cana-de-açúcar para plantas com diâmetro médio do caule de 3,4 cm, obtidos com base nas medições de transpiração obtidas a partir do método gravimétrico em condições de céu parcialmente nublado. 50
- 5.19.** Velocidade da seiva da cana-de-açúcar para plantas com diâmetro médio do caule de 3,4 cm, obtidos com base nas medições de transpiração obtidas a partir do método gravimétrico em condições de céu nublado. 50
- 5.20.** Variações típicas da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) sob condições de céu claro em Viçosa-MG. As medições foram realizadas no dia 21 de abril de 2010 no interior de uma casa de vegetação não climatizada. 52
- 5.21.** Transpiração horária da cana-de-açúcar em condições de céu claro no dia 21 de abril de 2010. As medições foram conduzidas simultaneamente em três plantas utilizando-se balanças de precisão (método gravimétrico). 52
- 5.22.** Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar, medidas acima (0,9 cm) e abaixo (-0,4 cm) da fonte de aquecimento, e a diferença de temperatura entre elas (Dif), às 0 hora (a); às 8 horas (b); às 12 horas (c) e às 16 horas (d). As medições foram realizadas no dia 21 de abril de 2010. 54

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Descrição
ρ_s	Densidade da seiva (kg m^{-3})
ρ_{TV}	Densidade do tecido vegetal (kg m^{-3})
CE	Condutividade elétrica (dS m^{-1})
c_{pS}	Calor específico da seiva ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
c_{pTV}	Calor específico do tecido vegetal ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
d	Índice de concordância
Dif	Diferença entre as temperaturas da seiva medidas acima (0,9cm) e abaixo (-0,4cm) da fonte de aquecimento ($^\circ\text{C}$)
DPV_{ar}	Déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar (hPa)
MBE	Erro médio de estimativa ($\text{g planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$; $\text{g planta}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
m_{TV}	Massa do tecido vegetal do segmento de caule ou ramo (kg)
n	Número de observações
P	Potência elétrica aplicada na superfície do segmento considerado (W)
Q_{ARM}	Calor armazenado pelo segmento vegetal (W)
Q_C	Calor transferido por condução nas direções axial e radial, concomitantemente (W)
Q_S	Calor transferido pelo transporte de seiva na direção axial (W)
r	Coefficiente de correlação
R	Resistência elétrica do dispositivo de aquecimento (Ω)
R_g	Radiação solar incidente (W m^{-2})
RMSE	Raiz quadrada do erro médio de estimativa ($\text{g planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$; $\text{g planta}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

T_{ar}	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
T_{cm}	Temperatura do centro da manta de isolamento térmico posicionada ao nível da fonte de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)
t_e	Tempo transcorrido até que os sensores restabeleçam a diferença de temperatura existente antes do aquecimento (s)
t_i	Temperatura média da seção inferior do segmento de caule considerado ($^{\circ}\text{C}$)
T_{iFS}	Transpiração medida pelo método do fluxo de seiva ($\text{g planta}^{-1} \text{h}^{-1}$)
T_{iP}	Transpiração medida gravimetricamente ($\text{g planta}^{-1} \text{h}^{-1}$)
t_s	Temperatura média da seção superior do segmento de caule considerado ($^{\circ}\text{C}$)
T_{sa}	Temperatura da seiva medida a 1,5 cm acima da fonte de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)
T_{sx}	Temperatura da seiva medida a 1,5 cm abaixo da fonte de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)
t_{TV}	Temperatura média do tecido vegetal ($^{\circ}\text{C}$)
U	Tensão elétrica aplicada nos terminais resistivos (V)
UR	Umidade relativa do ar (%)
V_{pc}	Velocidade do pulso de calor (mm s^{-1})
V_s	Velocidade deslocamento da seiva (mm s^{-1})
X_j	Distância de posicionamento do sensor de temperatura situado a jusante da fonte de calor (mm)
X_M	Distância de posicionamento do sensor de temperatura situado a montante da fonte de calor (mm)

RESUMO

BOEHRINGER, Davi, M. Sc.; Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Determinação da transpiração da cana-de-açúcar por métodos térmicos.** Orientador: Sérgio Zolnier. Coorientadores: Aristides Ribeiro e Antonio José Steidle Neto.

O objetivo principal foi avaliar a aplicabilidade de métodos térmicos para medição do fluxo de seiva da cana-de-açúcar sob condições ambientais distintas. Para a avaliação dos métodos (balanço de energia e pulso de calor), foram realizadas campanhas de medição da transpiração e do fluxo de seiva da cana-de-açúcar em uma casa de vegetação. O experimento foi conduzido na área experimental do setor de Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. O monitoramento dos dados meteorológicos no interior da casa de vegetação foi realizado por meio de um sistema computadorizado de aquisição de dados. Ele foi capaz de monitorar o fluxo de seiva da cana-de-açúcar e de controlar a potência elétrica aplicada nos terminais resistivos da fonte de calor. Constatou-se que as necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar, em escala horária e diária, podem ser determinadas, de forma adequada, por meio de medições do fluxo de seiva com o método do balanço de energia em um segmento de caule. No entanto, em decorrência do grande volume de seiva armazenada nos colmos e da baixa velocidade de deslocamento da seiva em comparação com outras culturas, o método do pulso de calor não pôde ser implementado por meio da metodologia clássica proposta na literatura. Somente com a aplicação de pulsos mais prolongados, em escala de minutos ao invés de segundos, foi possível detectar variações de temperatura que pudessem

ser mensuradas pelo sistema de aquisição de dados. Desta forma, para que possa ser aplicada para a cana-de-açúcar, a teoria do método do pulso de calor precisa ser adaptada a partir de estudos específicos. Notou-se que, tanto a temperatura da seiva acima, quanto a temperatura abaixo da fonte de aquecimento comportam-se de maneira distintas após a aplicação do pulso de calor nos diversos horários do dia, respondendo às variações da transpiração para um dia de céu claro. Foi observado também que o componente do armazenamento de calor no caule não pode ser desconsiderado no balanço de energia como foi proposto por alguns autores para medições realizadas em outras culturas. Por outro lado, devido ao diâmetro expressivo dos colmos, é necessário instalar quatro termopares para obtenção da temperatura da seiva nos níveis acima e abaixo da fonte de aquecimento, sendo dois inseridos no centro e outros dois na superfície do colmo. Um termopar adicional deve ser colocado no centro da manta de isolamento térmico, ao nível da fonte de aquecimento, para quantificação da condução axial e radial de calor. A transpiração de plantas individuais de cana-de-açúcar foi ligeiramente subestimada pelo método do balanço de energia em escala horária (RMSE = 14,6 g planta⁻¹ h⁻¹; MBE = -4,7 g planta⁻¹ h⁻¹; r = 0,9065; d = 0,9432) e diária (RMSE = 97,1 g planta⁻¹ d⁻¹; MBE = -56,2 g planta⁻¹ d⁻¹; r = 0,9369; d = 0,9488), com diferenças da ordem de 4% em relação aos valores máximos de transpiração medidos. Com a realização de novas pesquisas para aprimoramento desta técnica, o método do balanço de energia tem grande potencial para se tornar a técnica de referência na calibração de outros métodos utilizados para quantificação do fluxo de vapor d'água da cana-de-açúcar para a atmosfera.

ABSTRACT

BOEHRINGER, Davi, M. Sc.; Universidade Federal de Viçosa, July, 2010.

Determination of transpiration of sugarcane by thermal methods.

Adviser: Sérgio Zolnier. Co-advisers: Aristides Ribeiro and Antonio José Steidle Neto.

The main objective of this research was to evaluate the applicability of thermal methods for measuring sugarcane sap flow under different environmental conditions. For the evaluation of methods (energy balance and heat pulse) measurement events were conducted in a greenhouse according to the transpiration and the sugarcane sap flow under cloudy skies and partly cloudy conditions. The experiment was conducted at the experimental field of Agricultural Meteorology sector from the Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa, Minas Gerais. The monitoring of meteorological data within the greenhouse was performed by a computerized data acquisition. It was able to monitor the sap flow from the due sugarcane culture and control the electric power applied to the resistive terminals of the heat source. Based on the results, was noticed that the water needing for the sugarcane culture in hourly and daily scale, may be adequately determined by means of sap flow measurements for using the method of energy balance according to the segment of stem. However, even with the large volume of stored sap in the stems and the low sap flow speed compared to other cultures, the heat pulse method could not be implemented through the methodology proposed on a classical knowledge literature. Only with the application of longer pulses in a scale of minutes instead of seconds, it was possible to detect temperature variations

that could be measured by the current data acquisition system. Thus such in order to be applied to the studied sugarcane, the theory of heat pulse method needs to be adapted from specific studies in that matter. It was noticed that, both as the low stream temperature, as the high stream temperature of the heat source show differences after the application of heat pulse in different times of the day, responding with transpiration changing compared to a day of clear skies. It was also observed that the component of heat storage in the stem cannot be disregarded for the energy balance as proposed by some authors for measurements performed in other cultures. Moreover, considering the significant diameter of the stems is necessary to install four thermocouples to obtain the temperature of the sap in the levels above and below from the heat source, two from those inserted in the center and other two in its surface. An additional thermocouple should be placed in the center of the blanket insulation, at the heat source, to quantify the axial and radial conduction of heat. The transpiration of individual sugarcane plants was slightly underestimated by the method of energy balance in the hourly scale (RMSE = 14,6 g planta⁻¹ h⁻¹; MBE = -4,7 g planta⁻¹ h⁻¹; r = 0,9065; d = 0,9432) and daily (RMSE = 97,1 g planta⁻¹ d⁻¹; MBE = -56,2 g planta⁻¹ d⁻¹; r = 0,9369; d = 0,9488), with differences about 4% compared to maximum values of transpiration measured. With the procedure of the new research for improvement of this technique, the energy balance method has great potential to become a referential technique for calibration of other similar methods in order to quantify the water flow of vapor from sugarcane to the atmosphere.

1. INTRODUÇÃO

O uso de biocombustíveis, em substituição a fontes energéticas não renováveis como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral, tem sido muito incentivado nos últimos anos como alternativa de mitigar as alterações climáticas constatadas, a partir da era industrial. Além disso, o uso de combustíveis renováveis também favorece o aumento da segurança energética, a criação de empregos e o desenvolvimento rural (MAPA, 2006).

A cana-de-açúcar desempenha papel de extrema importância para a economia brasileira, com a produção de álcool e de açúcar para o mercado interno e externo, bem como a produção de composto orgânico e de volumoso para uso na alimentação animal. A produção brasileira, em 2009, foi de 671,4 milhões de toneladas, com produtividade média de $78,85 \text{ t ha}^{-1}$ (IBGE, 2010). Essa produção corresponde a um incremento de 4% em relação à safra anterior,

O Estado de São Paulo destaca-se como o maior produtor de cana-de-açúcar, compreendendo cerca de 58% da produção nacional (388,93 milhões de toneladas) na safra 2009. No entanto, Minas Gerais, Paraná, Alagoas e Pernambuco também possuem produções expressivas (IBGE, 2010).

Em Minas Gerais, os dados do IBGE revelam que, na safra 2009, foram produzidas 58,38 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em área colhida de 715,62 mil hectares, um incremento de mais de 20% em relação à produção da safra anterior.

A expansão de áreas produtoras de cana-de-açúcar tem levado à necessidade de pesquisas que contemplem o aumento de produtividade e, principalmente, auxiliem os produtores na otimização do uso da água, seja pela aplicação de volumes de água mais adequados (IGBADUN et al., 2006), utilização de sistemas de irrigação mais eficientes (RAJAK et al., 2006) ou melhorias no manejo de irrigação (JALOTA et al., 2006). Sob as condições de cultivo em sequeiro, os estudos sobre o consumo de água, por diferentes variedades de cana-de-açúcar, tornam-se importantes, em razão de existir uma variação genotípica à resposta ao estresse hídrico (SMIT & SINGELS, 2006; TEJERA, 2007). Em cultivos irrigados, o conhecimento da transpiração é fundamental para o manejo da frequência e duração dos eventos de irrigação (STEIDLE NETO et al., 2005; ZOLNIER, 2004). Por isso, há grande interesse pelo uso de métodos que permitam a determinação isolada da transpiração e não da perda total de água pela cultura, que inclui a evaporação da água na superfície do solo ou substrato (ZOLNIER et al., 2003). Assim, se faz necessário o desenvolvimento de sensores eletrônicos para medir a transpiração das plantas. Por esses motivos, nos últimos anos, houve aumento expressivo no número de pesquisas científicas relacionadas à medição da transpiração por meio de técnicas térmicas, a partir da determinação do movimento de seiva no interior do caule.

No Brasil, a aplicabilidade de alguns métodos térmicos para a determinação da transpiração foi testada em mudas de limoeiro (TREJO-CHANDIA et al., 1997), lima ácida irrigada (ROJAS et al., 2007), milho (GOMIDE et al., 2005) e para detectar obstruções do xilema da laranjeira,

causadas pela clorose variegada dos citros (MACHADO et al., 2006). No entanto, poucos trabalhos, relacionados à aplicabilidade de técnicas em plantas de cana-de-açúcar foram publicados no Brasil (ALVES, 1999) e no exterior (CHABOT et al., 2002; CHABOT et al., 2005).

A base teórica desses métodos térmicos foi apresentada e discutida em revisões científicas (SWANSON, 1994; SMITH; ALLEN, 1996; BAUERLE et al., 2002).

O método do balanço de energia consiste na aplicação contínua de calor ao caule de uma planta e as medições somente são conduzidas quando o sistema permanece em estado aproximadamente permanente. Nesse caso, a taxa de variação da temperatura da seiva no decorrer do tempo é praticamente nula. A diferença de temperatura acima e abaixo da fonte de aquecimento é usada para medição do fluxo de seiva. Já o método do pulso de calor consiste na aplicação intermitente de energia térmica em um segmento do caule, seguido do monitoramento da temperatura da seiva a jusante e a montante do dispositivo de aquecimento. Normalmente, o caule é perfurado em três pontos para inserção da sonda de calor e dos sensores utilizados no monitoramento da temperatura.

Estudos que utilizam métodos de medição do fluxo de seiva são de grande importância para subsidiar pesquisas que visam identificar variedades de cana-de-açúcar resistentes ao estresse hídrico. Adicionalmente, a medição do fluxo de seiva também é importante não somente no campo da agrometeorologia, mas por possuir potencial para ser utilizada em estudos de natureza fisiológica, visando a identificação de

doenças vasculares e estudos destinados à quantificação do movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera. Portanto, a determinação do método apropriado para medição do fluxo de seiva tem inúmeras aplicações práticas e científicas que pode contribuir para melhoria da eficiência do uso de água pela cultura da cana-de-açúcar.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Avaliar a aplicabilidade de métodos térmicos para medição da transpiração da cana-de-açúcar, sob condições ambientais distintas.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver e implementar um sistema computadorizado de aquisição de dados para monitorar o fluxo de seiva da cana-de-açúcar em tempo real e para controlar a potência elétrica aplicada nos terminais resistivos da fonte de calor.
- Avaliar o desempenho do método do balanço de energia em um segmento de caule, para determinação da transpiração da cana-de-açúcar, utilizando-se medições gravimétricas como padrão comparativo.
- Analisar o comportamento da temperatura da seiva acima e abaixo da fonte de aquecimento, após a aplicação de pulsos de calor.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma gramínea semiperene, pertencente à família Poaceae, que tem suas origens na Ásia. Do ponto de vista comercial, a maior parte é produzida entre as latitudes 35°N e 30°S. A cultura desenvolve-se bem na estação quente, com incidência de alta radiação e umidade do solo adequada, seguida de um período seco para maturação e colheita, caracterizado como medianamente frio, porém sem geadas. A temperatura ótima para a brotação das gemas é de 32 a 38 °C e para o crescimento adequado está entre 22 e 30 °C. Entretanto, para a maturação, são desejáveis temperaturas relativamente baixas, na faixa de 10 e 20 °C (ANDRADE, 2008). O crescimento é desprezível sob temperatura acima de 38 °C (INMAN-BAMBER, 1994; BARBIERI; VILLA NOVA, 1977; DOOREMBOS; KASSAN, 1994).

O ciclo evolutivo da cultura pode ser de 12 meses (cana de ano – CA) e 18 meses (cana de ano e meio – CAM) em cana-planta. Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses para todas as variedades. Podem ser feitos cinco ou mais cortes; no entanto, a cada ciclo, deve-se investir significativamente em insumos e tratos culturais para manter a produtividade (FORTES, 2003).

Câmara; Oliveira (1993) apresentaram quatro diferentes etapas para a fenologia da cana-planta: brotação e emergência dos brotos (colmos primários); afilhamento e estabelecimento da cultura (da emergência dos

brotos ao final do afilhamento); período de grande crescimento (do final do afilhamento ao início de acumulação da sacarose) e maturação (intenso acúmulo de sacarose nos colmos).

É uma cultura moderadamente sensível à salinidade, possuindo grandes exigências de nitrogênio e potássio, com baixa necessidade de fósforo. Na fase de amadurecimento, o teor de nitrogênio no solo deve ser menor para possibilitar acumulação de açúcar, principalmente quando o período de maturação ocorre em regiões de clima úmido e quente (DOOREMBOS; KASSAN, 1994).

Por ser uma planta com metabolismo C4, o ponto de saturação de luz é elevado e varia dependendo do cultivar. A radiação solar afeta todos os estádios de desenvolvimento da cultura, com isso, quando a cana-de-açúcar está submetida a baixas luminosidades, os colmos apresentam-se finos e alongados e as planta acumulam menos matéria seca (ANDRADE, 2008). Santos (2001) cita que a radiação solar, tanto em intensidade como em duração (fotoperíodo), é muito importante na fase de perfilhamento, pois favorece a produção de substâncias reguladoras do crescimento e, na maturação, intensifica o acúmulo de sacarose nos colmos. Fortes (2003) cita que a disposição vertical das folhas em relação aos colmos e ao alto índice de área foliar, que pode chegar a 7, promove o aumento da capacidade fotossintética, pois proporciona maior incidência de radiação fotossinteticamente ativa no dossel da cultura, que geralmente possui alta densidade populacional.

3.2 Transpiração vegetal

Parte da água contida no solo é absorvida pelas plantas por meio das raízes. A água é transportada pelo vegetal por uma rede formada de vasos, nos quais escoam o floema e o xilema. O floema distribui, a partir das folhas, uma solução concentrada e rica em substâncias nutritivas, formada basicamente por solutos orgânicos (fotossintetizados). O xilema assegura o transporte para as folhas de uma solução diluída, proveniente do sistema radicular. A transpiração vegetal permite que as células foliares recebam elementos e substâncias dissolvidas na água procedentes do solo (ALVES, 1999).

As perdas de água por um vegetal ocorrem nas formas gasosa (vapor d'água) e líquida. A predominância é a gasosa, que ocorre por intermédio dos estômatos (80 a 90% da perda de água total de um vegetal). Todas as superfícies de um vegetal, em contato direto ou indireto com a atmosfera, estão sujeitas a perder maior ou menor quantidade de água por transpiração. Caules, flores e frutos transpiram, mas a maior perda de água por transpiração se dá por meio das folhas. O grau de abertura dos estômatos é variável nas diferentes horas do dia, o que determina as perdas de água pelo vegetal ao longo do dia. A transpiração é um processo que ocorre, essencialmente, em duas fases: primeiramente, por meio da evaporação de água para os espaços intercelulares e, posteriormente, a partir da difusão do vapor d'água para a atmosfera (VERTUAN, 2003).

O principal mecanismo de controle da transpiração ocorre por meio das aberturas e dos fechamentos dos estômatos, que são afetados pelo grau de saturação hídrica das células estomáticas, podendo haver grande restrição do processo quando o déficit de água na planta for muito severo (ALVES, 1999).

Ao mesmo tempo em que as plantas necessitam abrir os estômatos para absorver CO_2 e, assim, realizar a fotossíntese, também precisam fechá-los para evitar a perda de água para a atmosfera. A solução encontrada está fundamentada na regulação temporal da abertura estomática. À noite, quando não há fotossíntese e, portanto, não há demanda por CO_2 dentro da folha, a abertura estomática torna-se reduzida. No período da manhã, com suprimento abundante de água e quando a radiação solar incidente na folha favorece altas taxas de fotossíntese, a demanda por CO_2 dentro da folha é alta e, por isso, as cavidades estomáticas permanecem amplamente abertas (VERTUAN, 2003).

A taxa de transpiração é afetada não somente pelos estômatos, mas também pela profundidade efetiva do sistema radicular, pelo tipo de vegetação, pelo vento, pela temperatura e pela umidade do ar (ALVES, 1999). Pinto et al. (1976) mencionam que a luminosidade, o calor e a maior umidade propiciam a abertura dos estômatos das folhas e influenciam diretamente a transpiração, além das condições de umidade no solo. Em geral, a transpiração decresce com o aumento da tensão da umidade do solo (MOTA, 1987).

3.3 Fluxo de seiva

Medições do fluxo de seiva têm sido utilizadas para identificar a ocorrência de estresse hídrico (COHEN et al, 1990), avaliar o estresse mecânico causado pela poda de árvores e pelo transplântio de mudas (LOTT et al., 1996), bem como quantificar alterações fisiológicas (WULLSCHLEGER et al., 1998). No Brasil, a aplicabilidade de alguns métodos térmicos foi testada em mudas de limoeiro (TREJO-CHANDIA et al., 1997), plantas de lima ácida (MARIN et al., 2001; ROJAS, 2003), milho (SANTOS et al., 1999; GOMIDE et al., 2005) e para detectar obstruções do xilema da laranjeira, causadas pela clorose variegada dos citros (MACHADO et al., 2006).

Em contraste com medições porométricas, que são conduzidas em folhas isoladas e, portanto, altamente influenciadas pela incidência de radiação solar e posição dessas no dossel vegetativo, medições do fluxo de seiva possibilitam a quantificação da transpiração de componentes vegetativos ou mesmo de uma planta inteira (BAUERLE et al., 2002).

Vários métodos térmicos têm sido usados para medições do fluxo de seiva na pesquisa científica, principalmente relacionados ao uso eficiente de água, desde que a instrumentação para esse fim se tornou disponível no início dos anos de 1990 (GRIME; SINCLAIR, 1999). No entanto, poucos trabalhos, relacionados à aplicabilidade de técnicas em plantas de cana-de-açúcar foram publicados no Brasil (ALVES, 1999) e no exterior (CHABOT et al., 2002; CHABOT et al., 2005).

A base teórica desses métodos térmicos foi apresentada e discutida em revisões científicas (SWANSON, 1994; SMITH; ALLEN, 1996; BAUERLE et al., 2002). Esses autores destacaram a importância da escolha apropriada do método de medição para cada espécie vegetal, enfatizando notoriamente as fontes potenciais de erros, principalmente se as condições ambientais em que as medições estão sendo conduzidas não atenderem as considerações teóricas preconizadas (GRIME; SINCLAIR, 1999).

Atualmente, cinco técnicas estão documentadas e têm sido aplicadas para medição do fluxo de seiva em diversas espécies vegetais: balanço de energia; pulso de calor; dissipação térmica; balanço de calor em uma parcela do tecido vegetal; aquecimento do tecido vegetal por raios laser e medição da temperatura por meio de termopares a infravermelho. Dentre os métodos mencionados, os dois primeiros têm sido amplamente aplicados em pesquisas científicas (SWANSON, 1994; SMITH; ALLEN, 1996; BAUERLE et al., 2002).

Os resultados experimentais obtidos em diversas pesquisas científicas sugerem que existem várias fontes de erros potenciais durante as medições do fluxo de seiva e, portanto, não existe método de uso genérico, o que sugere a necessidade de estudos específicos para cada espécie vegetal.

3.3.1 Método do balanço de energia

A fundamentação teórica para aplicação do método do balanço de energia foi descrita por SAKURATANI (1981) e tem sido aplicada em vários outros estudos (CHABOT et al., 2005; BAKER; VAN BAVEL, 1987).

Senock & Ham (1993) definem resumidamente o método de balanço de energia, considerando-se o fluxo de calor dentro de um segmento isolado da seção do caule do vegetal. Assim, o balanço de energia é realizado em um volume de controle, o qual é definido por uma seção do caule do vegetal (CHANDRA et al., 1994).

A seção do caule utilizada para as medições é envolvida por um isolante, que se estende para baixo e para cima da seção do volume de controle, minimizando, assim, as perdas de calor por condução radial para o meio externo (CHANDRA et al., 1994).

Para estimar o balanço de energia, é necessário se obter as temperaturas em alguns pontos desse volume de controle. Portanto, é necessário a utilização de termopares, que são inseridos nos pontos de interesse, para se obterem os dados de temperatura. Esses são separados por uma distância conhecida, permitindo a determinação do gradiente de temperatura entre alguns pontos determinados (CHANDRA et al., 1994).

Para que os gradientes de temperatura sejam relacionados com os fluxos de transpiração, é necessária a colocação precisa dos termopares (STEINBERG et al., 1989). Outro fator importante, associado à exatidão das medições do fluxo de seiva, está relacionado com o aquecimento

externo do caule, provocado pela radiação solar direta (COHEN et al., 1993). Outra desvantagem do método do balanço de energia, com fluxo de calor constante, deve-se ao aumento de temperatura do caule, que pode ser prejudicial ao vegetal. Esse aumento é encontrado em condições de baixos fluxos de seiva, proporcionando, assim, uma diminuição do fluxo de calor por convecção ao longo do caule (HAM; HEILMAN, 1990). A elevação da temperatura também poderá intensificar a perda de calor por condução radial, que em algumas condições poderá atingir a mesma ordem de grandeza dos fluxos de calor por convecção (HAM; HEILMAN, 1990). Essas condições prejudicam a exatidão do método.

SHACKEL et al. (1992) verificaram que para taxas elevadas de fluxo de seiva, os gradientes de temperatura tornam-se muito pequenos. Nessas condições, a precisão das medidas dos gradientes de temperatura é fundamental para a confiabilidade dos resultados.

DUGAS et al. (1993) estudaram as transpirações calculadas pelos métodos do balanço de calor, porômetro e óxido de deutério (isótopo pesado do hidrogênio), comparando-os com a transpiração medida pelo método gravimétrico. A menor diferença, quando comparada ao método gravimétrico, foi obtida com a técnica do balanço de energia em um segmento de caule, indicando ser este um bom método para determinação da transpiração.

3.3.2 Método do pulso de calor

A técnica de medição da velocidade do pulso de calor foi desenvolvida por Huber (1936), citado por ALVES (1999), como método de

medida da velocidade de deslocamento da seiva em caules de plantas. É uma técnica conveniente para medir o consumo de água em plantas altas, sem alterar o microambiente da copa.

Nesse método, o fluxo de seiva é medido indiretamente a partir da velocidade de deslocamento de um pulso de calor, que é transportado pelo movimento da seiva. Um dispositivo emite um breve pulso de calor dentro dos tecidos condutores de seiva. A partir da medida do tempo necessário para atingir um ponto situado a jusante da emissão, pode-se determinar a velocidade do fluxo de seiva (MARSHALL, 1958). Para calcular o fluxo total de seiva, é obrigatório o conhecimento da seção total de transporte da seiva. Diversos autores utilizaram essa técnica para avaliação de transpiração em várias espécies (COHEN et al., 1988; BURGESS et al., 2001; GIORIO; GIORIO, 2003).

Quando um pulso de calor é produzido por um dispositivo aquecedor inserido dentro do xilema da planta, o movimento desse é determinado por condução de calor através do lenho e por convecção do pulso de calor pelo movimento da seiva (MARSHALL, 1958). Segundo SWANSON; WHITFIELD (1981), a velocidade do pulso de calor é calculada pela equação 1.

$$V_{pc} = \frac{X_J - X_M}{2 t_e} \quad (1)$$

em que V_{pc} é a velocidade do pulso de calor (mm s^{-1}); t_e , o tempo transcorrido até que os sensores restabeleçam a diferença de temperatura existente antes do aquecimento (s); e X_J e X_M são as distâncias, em mm,

de posicionamento dos sensores de temperatura situados a jusante e a montante da fonte de calor, respectivamente.

MARSHALL (1958) demonstrou analiticamente que, em espécies lenhosas, a velocidade de deslocamento do fluxo de seiva é relacionada com a velocidade de deslocamento do pulso de calor (equação 2).

$$V_S = \frac{\rho_{TV} c_{pTV}}{\rho_S c_{pS}} V_{PC} \quad (2)$$

em que V_S é a velocidade deslocamento da seiva (mm s^{-1}); ρ_{TV} , a densidade do tecido vegetal, incluindo a seiva presente nos interstícios celulares (kg m^{-3}); ρ_S , a densidade da seiva (kg m^{-3}); e c_{pTV} e c_{pS} são os calores específicos ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) do tecido vegetal e da seiva, respectivamente.

De acordo com Edwards e Warwick (1984), citados por SMITH; ALLEN (1996), os parâmetros ρ_S e c_{pS} podem ser estimados como sendo iguais aos da água, enquanto ρ_{TV} e c_{pTV} podem ser considerados iguais a 1.530 kg m^{-3} e $1.380 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, para espécies lenhosas, respectivamente.

De acordo com SMITH & ALLEN (1996), o monitoramento da temperatura pode ser realizado tanto por termopares como por termistores. Dessa forma, o tempo de resposta dos sensores de temperatura pode ter impacto na exatidão das medições do fluxo de seiva. Normalmente, o caule é perfurado em três pontos para inserção da sonda de calor e dos sensores utilizados no monitoramento da temperatura. Esse procedimento,

extremamente invasivo, faz com que as medições do fluxo de seiva sejam modificadas no médio prazo pelo processo de cicatrização da planta, requerendo compensações aritméticas difíceis de serem implementadas.

Como a fonte de aquecimento é acionada de maneira intermitente para implementação do método do pulso de calor, a determinação correta da frequência e duração dos eventos de aplicação de calor é imprescindível para proporcionar um sinal de magnitude suficiente para ser detectado pelos sensores de temperatura e também não aquecer excessivamente o tecido vegetal (BAUERLE et al., 2002). Medições conduzidas em laboratório mostraram que a temperatura da seiva pode alcançar até 44 ± 2 °C, quando não há um controle adequado da potência elétrica aplicada nos terminais do dispositivo de aquecimento (MILLER et al., 1980).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Procedimentos experimentais

Para a avaliação dos métodos térmicos, visando à medição do fluxo de seiva, foi conduzido um experimento em casa de vegetação não climatizada, localizada na área experimental do setor de Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (latitude 20° 45' S; longitude 42° 52' O; e altitude de 690 m).

A casa de vegetação possui a maior dimensão orientada no sentido leste-oeste, cobertura construída com estrutura metálica em forma de arco e pilares de sustentação em concreto armado. O material plástico de cobertura é constituído de filme de polietileno de baixa densidade (PEBD), com espessura de 150 µm, possuindo aditivos contra a ação de raios ultravioleta. A instalação apresenta características modulares e pré-fabricadas, com 15,0 m de comprimento; 7,0 m de largura; e altura central de 3,5 m. Nas laterais da casa de vegetação, foi utilizada uma tela plástica branca (clarite) com malha de 1 mm para reduzir a entrada de insetos no ambiente de cultivo.

No total, 192 plantas de cana-de-açúcar (cv. RB867515) foram cultivadas em vasos plásticos com capacidade para 15 L, mas apenas uma pequena parcela foi utilizada nas medições. Os vasos foram preenchidos somente com 10 litros de um substrato comercial (Bioplant, MG, Brasil). O substrato era composto de casca de *Pinus*, agentes agregantes, vermiculita, fibra de coco e complementos minerais (NPK e

micronutrientes). No fundo de cada vaso de cultivo, foi perfurado um orifício circular para permitir a drenagem do excesso de água da irrigação ou de solução da fertirrigação através do substrato. Acima do orifício de drenagem, foi colocado um disco de tela plástica com malha de 1 mm para impedir a remoção do substrato. Adicionalmente, acima da tela plástica, foram depositados 500 g de carvão vegetal para facilitar a drenagem lateral no fundo de cada vaso.

Um perfil hidropônico de polipropileno (Hidrogood, Taboão da Serra, SP), com 2,6 m de comprimento, foi utilizado como calha para a coleta da solução nutritiva drenada em cada fileira, sendo instalado com inclinação de 4%. As extremidades do perfil foram vedadas com uma peça de borracha flexível, específica para esta finalidade. Na extremidade mais baixa do perfil, foi colocado um dreno, conectado a um vaso de 4 L para armazenamento da solução excedente, após a realização dos eventos de irrigação e fertirrigação. Cada perfil coletava a drenagem proveniente de seis vasos de cultivo, havendo no total 32 perfis de coleta de drenagem para os 192 vasos cultivados com plantas de cana-de-açúcar.

A condutividade elétrica (CE) da solução percolada nos vasos foi monitorada por meio de um condutímetro (modelo CDH-42, Omega, Stamford, CT, USA), sendo mantida entre 2,0 e 3,0 dS m⁻¹, por meio de fertirrigações periódicas. A solução nutritiva utilizada nas fertirrigações foi preparada manualmente em um tanque, utilizando-se fertilizante solúvel em água (Peters Professional 20-20-20 GP, Marysville, OH, USA).

As plantas foram irrigadas ou fertirrigadas por gotejamento (Figuras 4.1 e 4.2), com duração e frequência dos eventos controladas por temporizador.

No início do experimento, foram realizadas duas irrigações diárias de 1 min cada. No entanto, com o decorrer do experimento, a frequência e a duração dos eventos de irrigação foram aumentadas progressivamente, chegando a serem realizadas 10 irrigações de 1 min, distribuídas ao longo do período diurno nos últimos dias do experimento.

Após o início do perfilhamento, as brotações laterais foram removidas periodicamente, mantendo-se apenas um colmo por planta. Assim, com o objetivo de garantir o crescimento vertical e evitar o tombamento causado pelo próprio peso, as plantas foram tutoradas individualmente. Folhas secas não foram removidas.

Para minimizar a evaporação, a superfície do substrato de cultivo foi revestida com filme plástico de polietileno (Figura 4.2). Dessa forma, alterações de massa da parcela experimental, constituída do vaso plástico, substrato de cultivo, água retida no sistema radicular e uma planta de cana-de-açúcar, foram atribuídas exclusivamente à transpiração. Esse procedimento foi usado previamente por BAUERLE et al. (2002), tendo apresentado bons resultados.



Figura 4.1. Cultivo da cana-de-açúcar em substrato comercial acondicionado em vasos plásticos sob condições de casa de vegetação.



Figura 4.2. Detalhe do microtubo gotejador do sistema de irrigação e cobertura da superfície do substrato para minimizar a evaporação de água.

4.2 Sistema de aquisição de dados

Os sinais elétricos dos sensores responsáveis pela medição das variáveis meteorológicas no interior da casa de vegetação foram transmitidos a uma placa de aquisição de dados (modelo CYDAS 1602HR, CyberResearch, Branford, CT, USA), instalada em um microcomputador e gerenciada por um programa computacional especialmente desenvolvido para esta finalidade. O programa foi implementado usando a plataforma de programação C++ Builder (versão 6.0) no ambiente Windows. A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um sensor conjugado (modelo Humitter 50Y, Vaisala Inc., Woburn, MA, USA) que foi instalado no interior de um tubo de PVC branco, aspirado por meio de uma ventoinha (Figura 4.3). A estrutura em PVC foi projetada para impedir a incidência direta da radiação solar sobre os sensores e, concomitantemente, garantir uma taxa de ventilação adequada.

A radiação solar global foi medida por meio de um piranômetro (modelo LI-200SA, LI-COR, Lincoln, NE, USA) e a velocidade do ar, por um anemômetro de fio quente (modelo FMA-903-I, Omega, Stamford, CT, USA). O piranômetro e o anemômetro também foram fixados na estrutura em PVC. Inicialmente, os sensores foram dispostos a 1,5 m da superfície do solo e, posteriormente, o nível de posicionamento desse foi alterado periodicamente, de acordo com o crescimento da cana-de-açúcar, sempre procurando mantê-los um pouco acima do dossel vegetativo da cultura.



Figura 4.3. Vista do sistema de medição da radiação solar global incidente, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, instalado na estrutura em PVC, no interior da casa de vegetação.

Além dos dados do ambiente de cultivo, foram medidas a temperatura da seiva em diversos pontos no interior do caule, a temperatura na superfície do caule, a temperatura da manta de isolamento térmico e a transpiração da cana-de-açúcar, a partir de três balanças de precisão.

Pelo método gravimétrico, a transpiração foi determinada a partir de diferenças de massa de plantas individuais, enquanto a transpiração a partir de medições do fluxo de seiva pelo método do balanço de energia. Na última técnica, a temperatura da seiva foi medida no centro e na superfície dos colmos, em pontos situados acima e abaixo da fonte de aquecimento. Também foi medida a temperatura do centro da manta de isolamento térmico para quantificação do fluxo de calor por condução.

As temperaturas da seiva foram medidas com módulos seriais de aquisição de dados (LR-7018, LR COM) e o controle da fonte de

aquecimento (resistor) foi efetuado por meio do módulo de controle (i-7067D, LR COM). Os dados medidos em intervalos de tempo de 1 min foram transmitidos para o microcomputador por meio do protocolo serial (RS-232). A temperatura da seiva foi medida por meio de termopares do tipo cobre-constantan (Tipo T), que foram conectados aos módulos seriais 7018.

A transpiração foi monitorada por meio de três balanças de precisão (Tecnal, Piracicaba, SP), com capacidade individual de 12 kg e precisão de 0,1 g. Sobre cada uma delas foi colocado um vaso com uma planta de cana-de-açúcar (Figura 4.4).

A massa do conjunto constituído de vaso plástico, substrato, água e uma planta de cana-de-açúcar foi monitorada em intervalos de tempo de 1 min, no período compreendido entre 8 e 18 horas. Para determinação da transpiração, foram utilizadas três portas seriais do microcomputador, obtidas a partir da instalação de uma placa de expansão no “slot” PCI da placa-mãe, que possibilitaram a aquisição de dados das balanças de precisão.



Figura 4.4. Sistemas individuais de pesagem para medição da transpiração e do fluxo de seiva da cana-de-açúcar instalados sob vasos de cultivo no interior da casa de vegetação.

4.3 Método do balanço de energia

A técnica consiste na aplicação contínua de uma tensão elétrica nos terminais de um resistor de forma que a potência (P) seja dissipada na forma de calor. A fonte de aquecimento é instalada na superfície de um segmento vegetal (caule de uma planta) e o balanço de calor é obtido pela Equação 3.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Taxa de variação} \\ \text{da energia interna} \\ \text{do segmento vegetal} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Somatório das} \\ \text{Entradas de Calor} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Somatório das} \\ \text{Saídas de Calor} \end{array} \right]$$

$$\frac{d}{d\theta} (m_{TV} c_{pTV} t_{TV}) = P - (Q_C + Q_S) \quad (3)$$

em que $d/d\theta$ é o elemento infinitesimal de tempo; m_{TV} , a massa do tecido vegetal do segmento de caule (kg); c_{pTV} , o calor específico do tecido

vegetal ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); t_{TV} , a temperatura média do tecido vegetal ($^\circ\text{C}$); P , potência elétrica aplicada na superfície do segmento de caule (W); Q_C , calor transferido por condução através do material vegetal e, posteriormente, através da manta de isolamento térmico, considerando-se as direções axial e radial, concomitantemente (W); e Q_S , o calor transferido pelo transporte de seiva na direção axial (W).

Em condições de regime permanente e para plantas que possuem apenas um pequeno volume de seiva armazenada no tecido vegetal, a taxa de variação da temperatura do tecido vegetal ($dt_{TV}/d\theta$) se torna desprezível e o lado esquerdo da Equação 3 se anula. No entanto, para a cana-de-açúcar, esse termo precisa ser determinado e a Equação 3 deve ser reescrita como:

$$Q_S = P - (Q_C + Q_{ARM}) \quad (4)$$

em que Q_{ARM} é a quantidade de calor armazenado no segmento do caule (W). Portanto, o fluxo de seiva (F_S), expresso em g h^{-1} , foi determinado pela Equação 5.

$$F_S = \frac{3600 Q_S}{C_{pTV}(t_S - t_I)} = \frac{3600 [P - (Q_C + Q_{ARM})]}{C_{pTV}(t_S - t_I)} = \frac{3600 [U^2 / R - (Q_C + Q_{ARM})]}{C_{pTV}(t_S - t_I)} \quad (5)$$

em que t_S e t_I são as temperaturas médias das seções superiores e inferiores do segmento de caule, respectivamente ($^\circ\text{C}$); U é a tensão

elétrica aplicada nos terminais resistivos (V); e R é a resistência elétrica do dispositivo de aquecimento (Ω).

O calor transferido nas direções axial e radial foi estimado a partir da equação de Fourier, ou seja, multiplicando-se o gradiente de temperatura axial pela condutividade térmica do tecido vegetal. Neste experimento, os dois fluxos foram combinados, a partir da terminação do coeficiente global de transferência de calor por condução, que foi determinado, diariamente, no horário imediatamente anterior ao nascer do sol, quando o fluxo de seiva se torna praticamente nulo.

O Anexo 7.1 traz os procedimentos experimentais para instalação do sistema de medição de fluxo de seiva. Em cada sistema de medição, foram inseridos dois termopares no centro do colmo, sendo posicionados 1,5 cm abaixo e 1,5 cm acima da fonte de aquecimento (Figura 4.5). Além disso, foram instalados dois termopares na superfície do colmo, posicionados 1,5 cm abaixo e acima do nível de aquecimento. Finalmente, com o objetivo de medir a fluxo de calor por condução, foi instalado um termopar no centro da manta de isolamento térmico, posicionado ao nível da fonte de aquecimento.

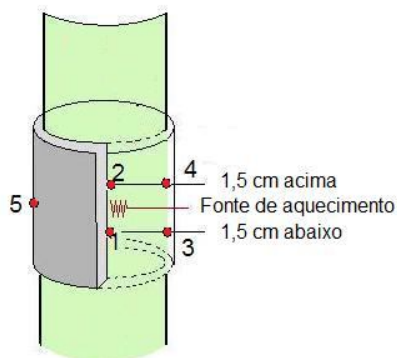


Figura 4.5. Posicionamento dos termopares em um colmo de cana-de-açúcar para implementação do método de balanço de energia. Os termopares foram inseridos no centro (1 e 2) e na superfície do colmo (3 e 4) e, adicionalmente, no centro da manta de isolamento térmico (5).

As três plantas permaneceram com o sistema por um período de aproximadamente um mês. Foram feitas avaliações em dias com condições de céu parcialmente nublado, nublado e com alterações severas na nebulosidade.

4.4 Método do pulso de calor

Os procedimentos experimentais, para instalação do sistema de medição de fluxo de seiva pelo método de pulso de calor, foram semelhantes ao usado pelo método de balanço de energia (Anexo 7.1), diferindo apenas na quantidade e distância dos termopares, em relação à fonte de aquecimento. Em cada sistema de medição, foram inseridos dois termopares no centro do colmo, sendo posicionados 0,4 cm abaixo e 0,9

cm acima da fonte de aquecimento. As três plantas permaneceram com o sistema por um período de aproximadamente um mês.

O pulso de calor era emitido ao se acionar a fonte de aquecimento, no início de cada hora, por um período de 7 min.

4.5 Análise estatística

Os valores do fluxo de seiva, determinados pelo método do balanço de energia, foram comparados com os de transpiração, medidos em base horária e diária por meio do método gravimétrico. As determinações gravimétricas foram consideradas como padrão para avaliação de desempenho do método de medição.

Para a avaliação do método do balanço de energia, foram calculados índices estatísticos de precisão (coeficiente de correlação) e de exatidão (índice de concordância), descritos pelas Equações 6 e 7, respectivamente. Adicionalmente, foram estimados os seguintes erros estatísticos mencionados por JACOVIDES et. al. (1995): erro médio de estimativa (MBE) e raiz quadrada do erro médio de estimativa (RMSE), especificados pelas Equações 8 e 9, respectivamente.

$$r = \frac{[\sum T_{i_{FS}} (T_{i_P} - \bar{T}_{i_P})]}{\left[\sum_{n=1}^n (T_{i_P} - \bar{T}_{i_P})^2 \sum_{n=1}^n (T_{i_{FS}} - \bar{T}_{i_{FS}})^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (T_{i_{FS}} - T_{i_P})^2}{\sum_{i=1}^n (|T_{i_{FS}} - \bar{T}_{i_P}| + |T_{i_P} - \bar{T}_{i_P}|)^2} \right] \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{i_{FS}} - T_{i_P}) \quad (8)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{i_{FS}} - T_{i_P})^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

em que “n” é o número de observações e T_{i_P} e $T_{i_{FS}}$ são os valores de transpiração medidos gravimetricamente e determinados pelo método de medição do fluxo de seiva, respectivamente. A barra sobre esses símbolos refere-se ao valor médio das repetições.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sistema de aquisição de dados

Na Figura 5.1 é apresentada a tela de apresentação do programa computacional desenvolvido para aquisição de dados de três sistemas de pesagem independentes (Figura 4.4), para medição da transpiração e do fluxo de seiva da cana-de-açúcar. O código fonte do programa computacional encontra-se disponível na íntegra no Anexo 7.2.

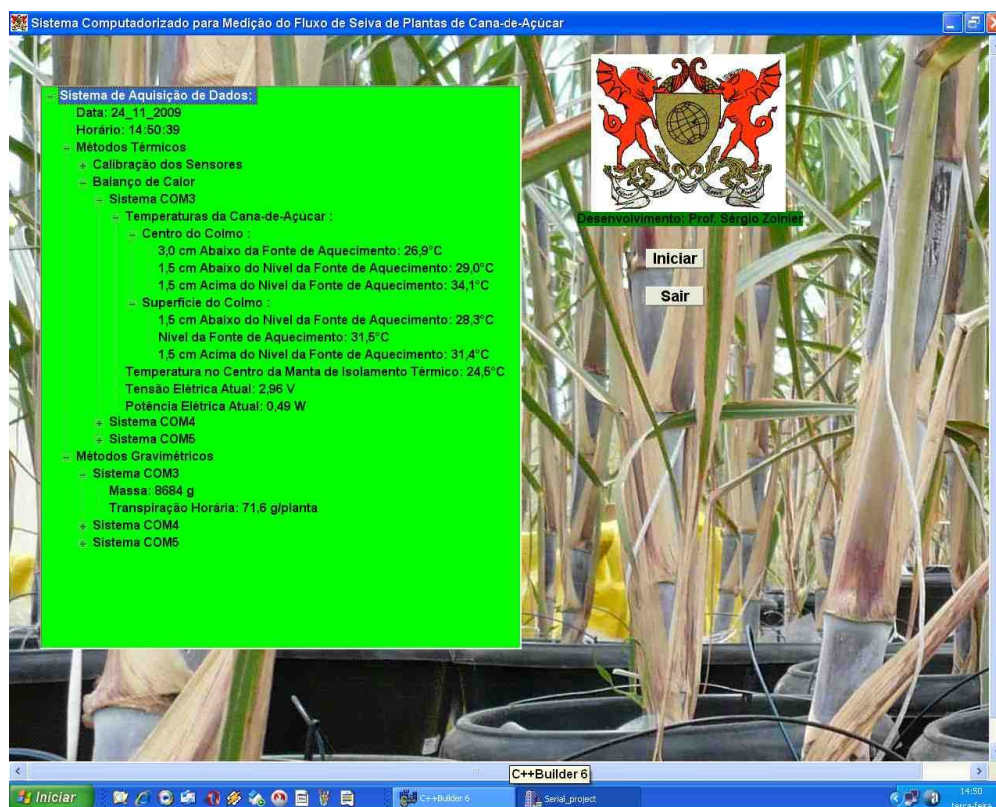


Figura 5.1. Tela de apresentação do programa computacional de aquisição de dados e controle da potência elétrica.

5.2 Método do balanço de energia

5.2.1 Condições de céu parcialmente nublado

Na Figura 5.2 são apresentadas as variações da radiação solar global (R_g), da temperatura do ar (T_{ar}) e do déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), sob condições de céu parcialmente nublado em Viçosa-MG, para medições realizadas no dia 21 de outubro de 2009. Nesse dia, a temperatura do ar variou de 20 e 30 °C, aproximadamente, enquanto o déficit de pressão de saturação de vapor d'água oscilou de 2,5 a 18 hPa. Já, a radiação solar global atingiu seu valor máximo, 600 W m^{-2} , às 11 horas.

As alterações horárias da transpiração da cana-de-açúcar, correspondente às condições meteorológicas do dia 21 de outubro, estão apresentadas na Figura 5.3, obtidas pelos métodos gravimétrico e balanço de energia. Constatou-se que o balanço de energia apresentou resultados satisfatórios para quantificação da transpiração da cana-de-açúcar, acompanhando de maneira mais evidente o comportamento da curva R_g , ao longo do período diurno.

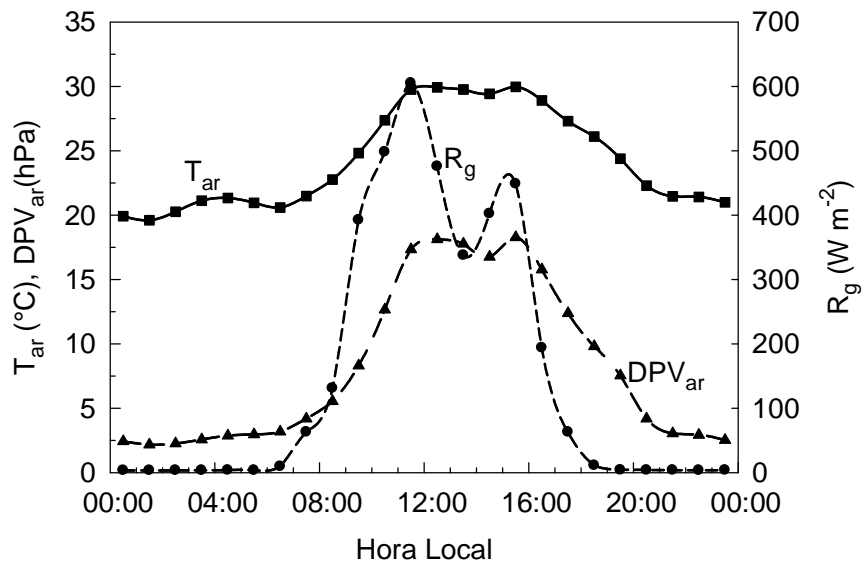


Figura 5.2. Variações típicas da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), sob condições de céu parcialmente nublado em Viçosa-MG, no dia 21 de outubro de 2009 e no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

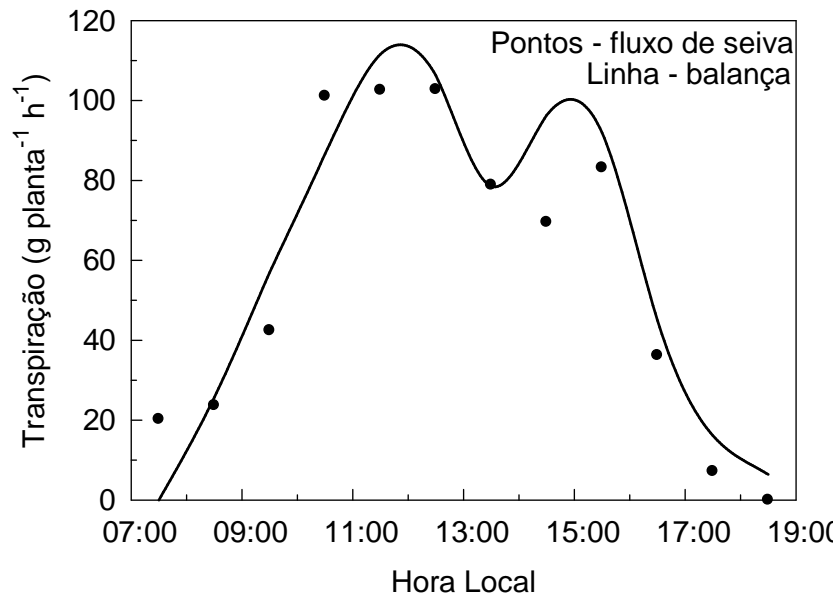


Figura 5.3. Transpiração horária da cana-de-açúcar em condições de céu parcialmente nublado, no dia 21 de outubro de 2009.

Nesse dia, a transpiração máxima da cana-de-açúcar esteve próxima de $100 \text{ g planta}^{-1} \text{ h}^{-1}$, quando os valores medidos de T_{ar} , DPV_{ar} e R_g foram, respectivamente, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 18 hPa e 600 W m^{-2} . Especificamente entre 7 e 8 horas, o método do balanço de energia superestimou a transpiração medida pelo método gravimétrico, enquanto na maior parte do período vespertino a transpiração foi ligeiramente subestimada.

Sob condições meteorológicas do dia 21 de outubro de 2009, a temperatura da seiva da cana-de-açúcar medida a $1,5 \text{ cm}$ abaixo (T_{sx}) e acima (T_{sa}) da fonte de aquecimento variou, respectivamente, de 26 a 34 e de 30 a $37 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 5.4). Observou-se também que com o aumento da radiação solar no início de período da manhã, houve perturbação da temperatura nos dois níveis descritos, em decorrência do deslocamento da seiva fria armazenada abaixo do segmento de cana-de-açúcar amostrado (volume de controle). Assim, o nível inferior teve redução da temperatura, em decorrência da chegada da seiva fria, e o nível superior recebeu a seiva que estava nas proximidades da fonte de aquecimento. Esse comportamento da temperatura da seiva em medições realizadas pelo método do balanço de energia também foi relatado por GRIME et al. (1995), resultando, de acordo com os autores, em excessiva subestimativa da transpiração. No entanto, esse fato não foi observado neste experimento, uma vez que o termo do armazenamento de calor foi incluído no balanço de energia.

A temperatura no centro da manta de isolamento térmico parece ter acompanhado às variações de temperatura do ar. Sofreu poucas alterações durante a madrugada, mas a partir das 8 horas teve um aumento considerável até em torno das 12 horas, onde atingiu quase $31 \text{ }^\circ\text{C}$. Essa

temperatura pouco variou até as 15 horas. Entretanto, a partir desse horário, nota-se que houve um acentuado decréscimo da temperatura no centro da manta de isolamento, acompanhando o decréscimo da temperatura do ar e a perda de energia de todo o sistema por causa da menor incidência de radiação solar.

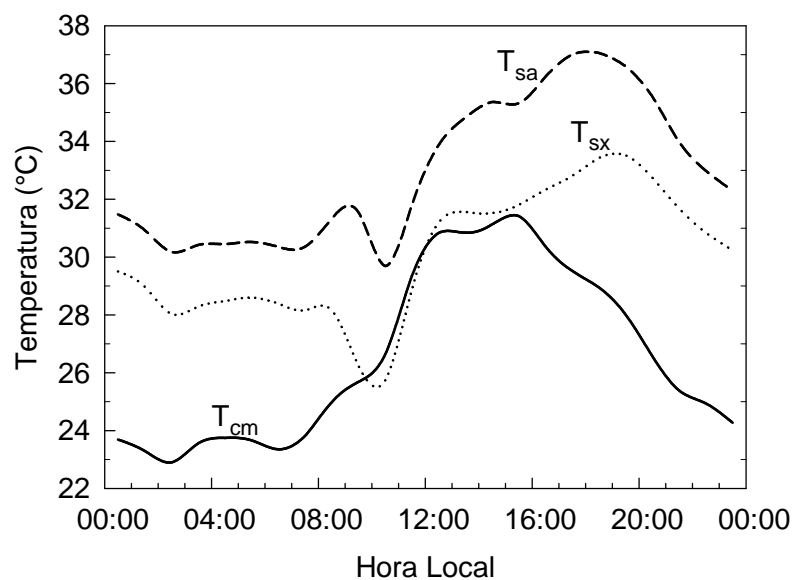


Figura 5.4. Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar medidas a 1,5 cm acima (T_{sa}) e abaixo (T_{sx}) da fonte de aquecimento e do centro da manta de isolamento térmico (T_{cm}), posicionada ao nível da fonte de aquecimento. As medições foram realizadas no dia 21 de outubro de 2009, no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

A Figura 5.5 exibe a alteração horária dos componentes do balanço de energia em um segmento de caule de cana-de-açúcar, sob condições de céu parcialmente nublado, durante o período diurno do dia 21 de outubro de 2009. A energia elétrica aplicada nos terminais do miniresistor se manteve constante ao nível de 1.760 J h^{-1} , correspondente a uma potência elétrica de $0,49 \text{ W}$, aproximadamente. A condução axial de calor

no interior do caule, para cima e para baixo da fonte de aquecimento, assim como a condução radial através da manta de isolamento térmico, foram combinadas em um único componente que diminuiu de aproximadamente 1.600 J h^{-1} , no início da manhã, até 200 J h^{-1} às 11 horas. Com a diminuição da radiação solar incidente sobre o sistema de medição, esse componente aumentou para 600 J h^{-1} entre 14 e 16 horas e, no final da tarde, alcançou o próprio valor da energia aplicada. Já, a energia armazenada no elemento de caule aquecido atingiu o valor mínimo de aproximadamente -200 J h^{-1} por volta das 10 horas, em decorrência do transporte da seiva fria situada abaixo do sistema de medição.

Em contraste, o valor máximo do componente de armazenamento foi observado por volta do meio-dia, alcançando 300 J h^{-1} aproximadamente. A partir desse horário, esse componente diminuiu até se tornar desprezível às 15 horas. Finalmente, a energia disponível para aquecimento da seiva variou de 200 J h^{-1} no início da manhã até atingir 1.700 J h^{-1} , por volta das 10 horas. Assim, nesse horário, a seiva foi aquecida em parte pela energia elétrica e também pela energia que estava armazenada no caule e que foi liberada pelo resfriamento desse, conforme pode ser visualizado pelo decréscimo da temperatura da seiva T_{sa} e T_{sx} (Figura 5.4). A partir das 10 horas, a energia recebida pela seiva diminuiu para valores entre 1.100 e 1.300 J h^{-1} , no intervalo de tempo das 12 às 16 horas e, posteriormente, decresceu acentuadamente até o pôr-do-sol (Figura 5.5).

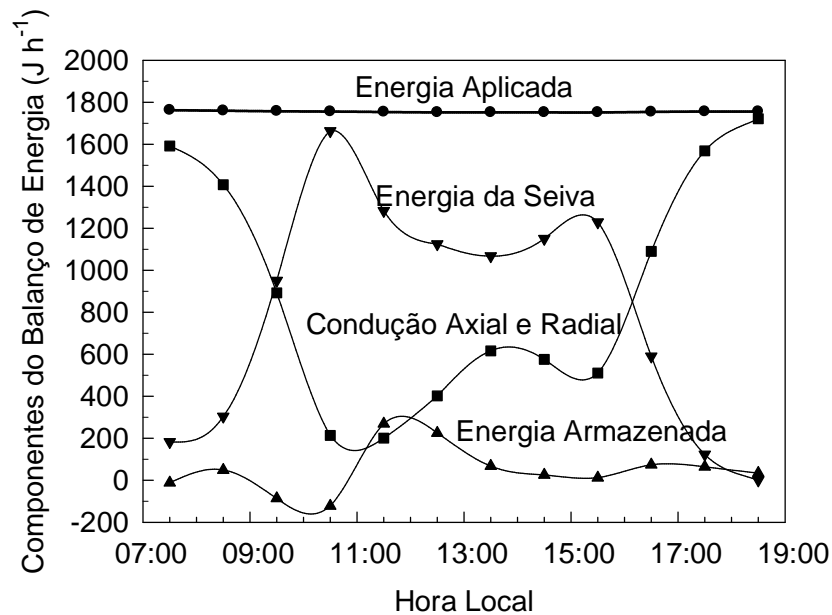


Figura 5.5. Variação horária dos componentes do balanço de calor em um segmento de caule da cana-de-açúcar sob condições de céu parcialmente nublado, no dia 21 de outubro de 2009.

Observou-se que, com o aumento da transpiração a partir das 9 horas, parte da energia aplicada de 1.760 J h^{-1} foi utilizada para aquecimento da seiva fria que se deslocou dos entrenós inferiores e atingiu o volume de controle. No entanto, com o aquecimento dos entrenós situados abaixo da manta de isolamento térmico, em decorrência da incidência de radiação solar, a variação da energia armazenada tornou-se positiva. Em contraste, com a redução da radiação solar, a energia armazenada diminuiu, assumindo valores próximos a zero entre 14 e 15 horas.

5.2.2 Condições de céu nublado

As variações típicas da radiação solar global (R_g), da temperatura do ar (T_{ar}) e do déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), sob condições de céu nublado em Viçosa-MG, são apresentadas na Figura 5.6.

Nesse caso, as medições foram conduzidas no dia 22 de outubro de 2009. A temperatura do ar manteve-se praticamente constante, um pouco superior a 20 °C durante o todo o período noturno anterior ao nascer do sol e parte do período manhã até às 10 horas. No entanto, próximo ao meio-dia, a temperatura alcançou o valor máximo de 24 °C e apresentou suave oscilação até às 17 horas. A partir desse instante, decresceu continuamente até 18 °C, por volta das 24 horas. Paralelamente, o DPV_{ar} e a R_g também estiveram muito baixos, entre 2 e 5 hPa e entre 0 e 220 $W m^{-2}$, respectivamente. Entre 11 e 12 horas e entre 12 e 13 horas, a R_g oscilou de 210 para 100 $W m^{-2}$ e de 100 para 220 $W m^{-2}$, respectivamente. Posteriormente, sofreu redução até 70 $W m^{-2}$.

A influência das condições meteorológicas sobre a transpiração da cana-de-açúcar está demonstrada na Figura 5.7. Verificou-se que, durante o período diurno, a transpiração determinada pelo método gravimétrico variou de 5 para 32 $g planta^{-1} h^{-1}$, entre o início do período da manhã e 11 horas, aproximadamente. A partir desse horário, a transpiração sofreu oscilações de acordo com a variação correspondente da radiação solar global. No entanto, com exceção do início da manhã, a transpiração determinada pelo método do balanço de energia foi subestimada a partir das 11 horas, mas os erros foram da ordem de apenas 5 $g planta^{-1} h^{-1}$.

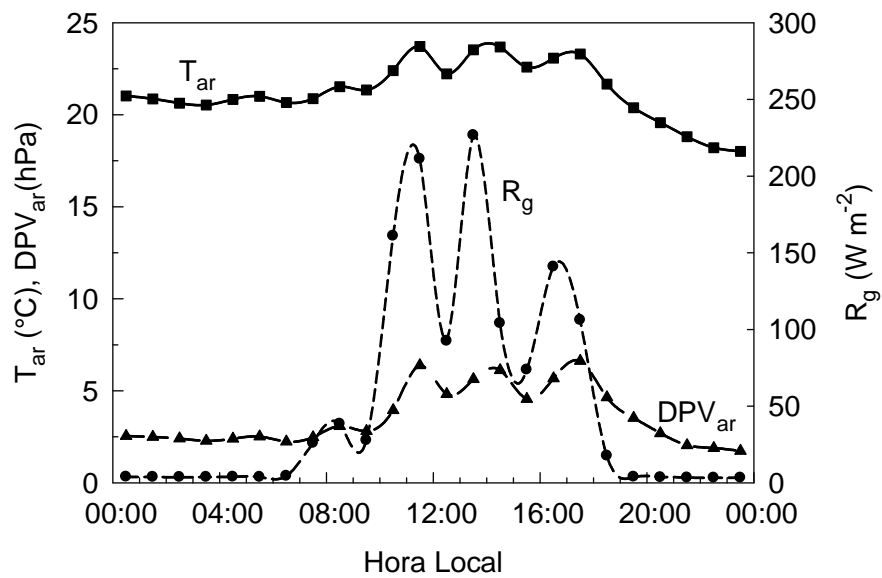


Figura 5.6. Variações típicas da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), sob condições de céu nublado em Viçosa-MG, no dia 22 de outubro de 2009, e no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

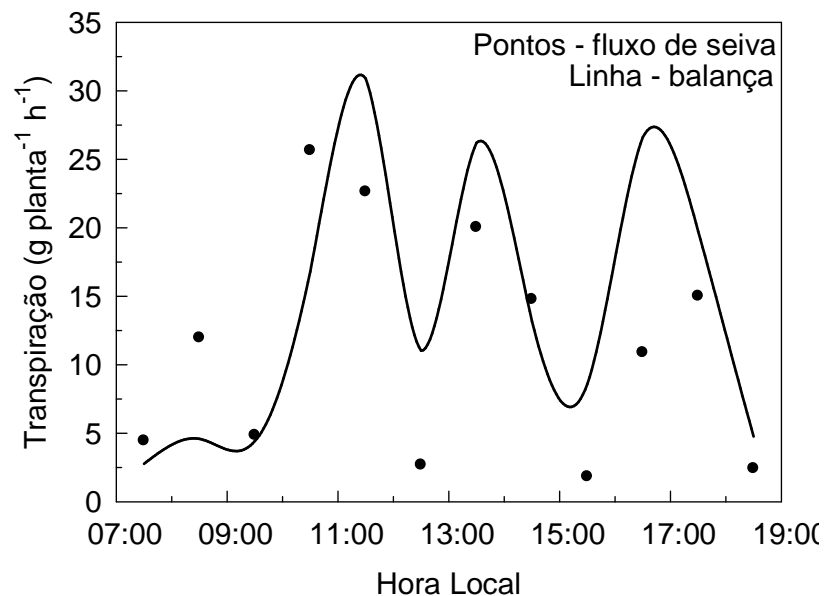


Figura 5.7. Transpiração horária da cana-de-açúcar, em condições de céu nublado, no dia 22 de outubro de 2009.

Mesmo sob condições de céu nublado, as pequenas alterações da R_g afetaram o equilíbrio do sistema de medição, uma vez que a temperatura T_{sx} sofreu maiores perturbações em relação à T_{sa} (Figura 5.8), que, por sua vez, exibiu comportamento mais estável durante o período diurno. Similarmente à T_{sx} , a T_{cm} também sofreu perturbações com a alteração da R_g , mas essa somente foi expressiva próxima ao meio-dia. Mais uma vez, a T_{cm} parece ter acompanhado as variações na temperatura do ar.

Na Figura 5.9, observa-se que a energia armazenada no caule esteve praticamente constante ao longo do período diurno e que as oscilações da energia recebida pela seiva devem ser atribuídas somente às variações de dissipação de energia nas direções axial e radial. No caso específico da cana-de-açúcar que, geralmente, possui um caule com diâmetro entre 3 e 4 cm, a determinação exata da temperatura da seiva acima e abaixo da fonte de aquecimento se torna imprescindível para determinação da transpiração, em condições de céu nublado.

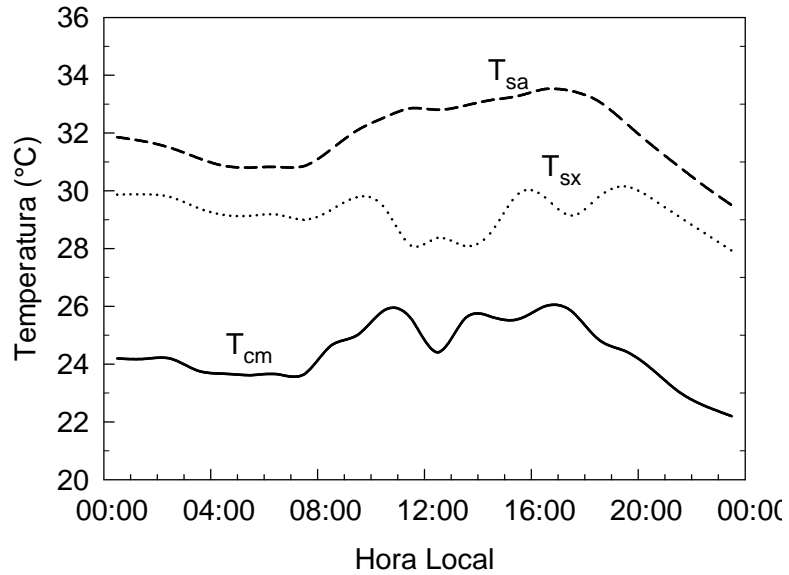


Figura 5.8. Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar medidas acima (T_{sa}) e abaixo (T_{sx}) da fonte de aquecimento e do centro da manta de isolamento térmico (T_{cm}). As medições foram realizadas no dia 22 de outubro de 2009, no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

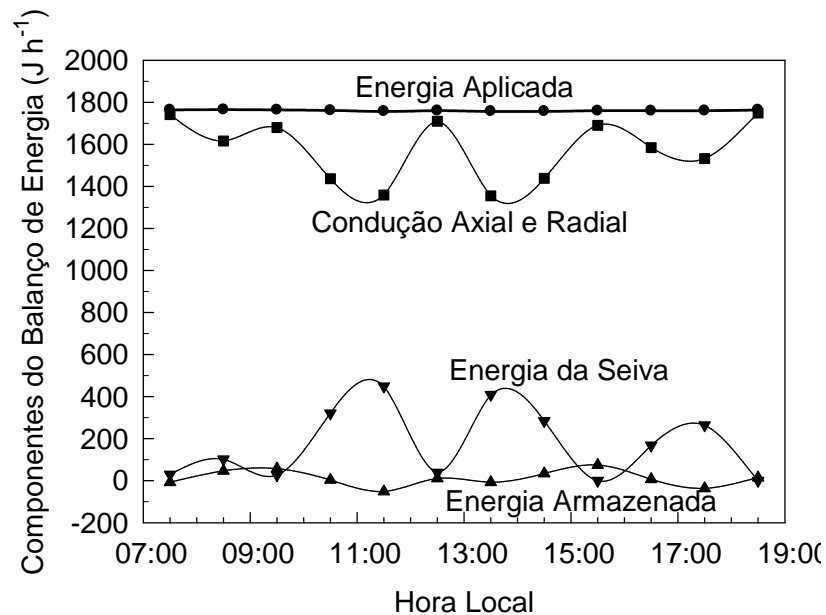


Figura 5.9. Variação horária dos componentes do balanço de energia em um segmento de caule de cana-de-açúcar, sob condições de céu nublado, no dia 22 de outubro de 2009.

Em decorrência da importância do fluxo de calor por condução na direção axial e radial, que foi de no mínimo 80% da energia elétrica aplicada, inevitavelmente ocorreram gradientes de temperatura nas duas direções do elemento de caule amostrado. GROOT; KING (1992) destacam que quando o fluxo de seiva é elevado, os gradientes de temperatura na direção radial são desprezíveis. Os resultados demonstraram que, no caso da cana-de-açúcar, esse fato não é observado, principalmente sob baixa transpiração.

5.2.3 Condições de severas alterações na nebulosidade

Uma avaliação mais detalhada do desempenho do método do balanço de energia aplicado à cana-de-açúcar, sob alterações severas das condições de nebulosidades em Viçosa-MG, pode ser realizada, a partir da inspeção das Figuras de 5.10 a 5.13. Nesse caso, as medições foram conduzidas no dia 30 de outubro de 2009.

Conforme apresentado na Figura 5.10, as temperaturas mínima e máxima do ar foram de 18 e 27 °C, respectivamente. A temperatura do ar aumentou suavemente a partir do nascer do sol até às 13 horas e oscilou um pouco até 16 horas, sofrendo redução gradual até o final do dia. No que se refere ao DPV_{ar} , essa variável se manteve praticamente constante durante o período noturno até o nascer do sol e, em seguida, aumentou até 15 hPa por volta das 16 horas. Posteriormente, o DPV_{ar} diminuiu gradativamente para 5 hPa às 24 horas. A R_g aumentou de 0 até o patamar de 200 W m^{-2} às 10 horas e sofreu novo incremento até o nível de 450 W m^{-2} às 13 horas. A partir desse horário, o aumento súbito da R_g de

450 para 700 W m^{-2} entre 13 e 14 horas e a sua queda posterior até às 16 horas tiveram pouco impacto na temperatura do ar. A partir das 16 horas, a R_g diminui rapidamente até o pôr-do-sol.

Na Figura 5.11, constata-se o comportamento da transpiração da cana-de-açúcar em decorrência das alterações meteorológicas descritas anteriormente. Novamente, como constatado nos dias 21 (condição de céu parcialmente nublado) e 22 de outubro (condição de céu nublado), a transpiração foi superestimada no início da manhã, mas foi determinada adequadamente até o meio-dia. Uma inspeção individual dos valores determinados às 14 e 15 horas (setas destacadas) mostra que as medições do fluxo de seiva pelo método do balanço de energia são seriamente afetadas pela oscilação da radiação, conforme também foi observado na Figura 5.7, para condições de céu nublado.

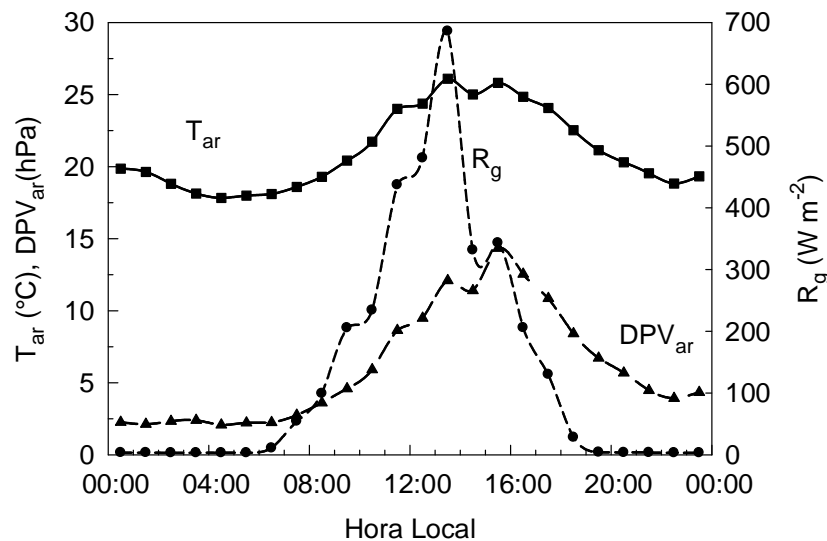


Figura 5.10. Variações da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), sob alterações severas das condições de nebulosidade em Viçosa-MG, no dia 30 de outubro de 2009, e no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

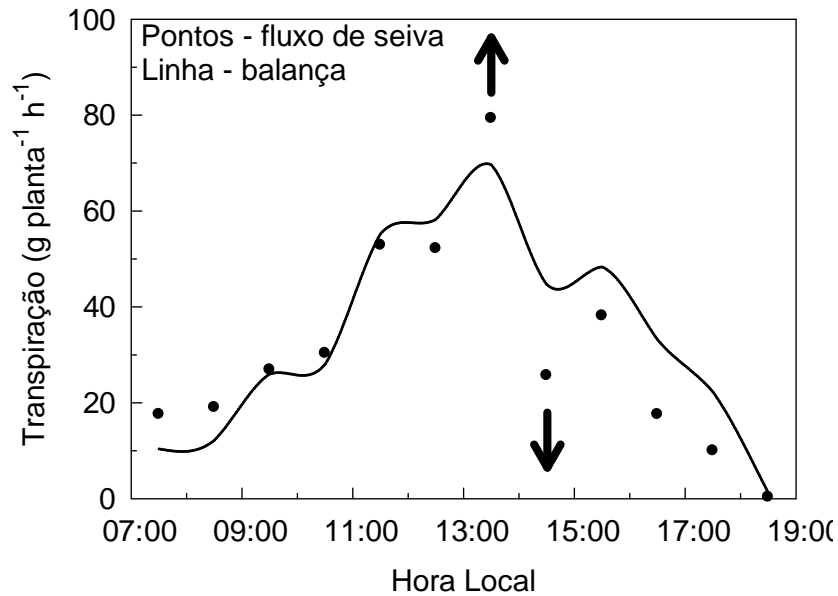


Figura 5.11. Transpiração horária da cana-de-açúcar, sob alterações severas das condições de nebulosidade, no dia 30 de outubro de 2009. As setas indicam medições do fluxo de seiva acentuadamente acima e abaixo da transpiração determinada pelo método gravimétrico.

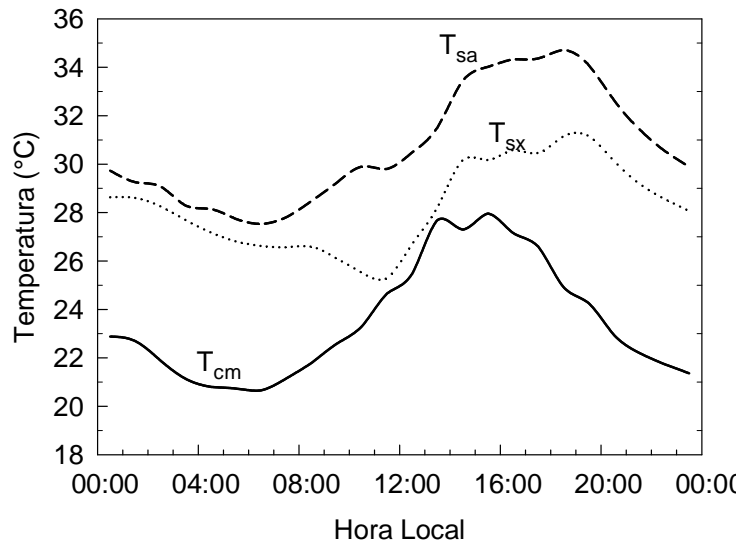


Figura 5.12. Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar medidas acima (T_{sa}) e abaixo (T_{sx}) da fonte de aquecimento e do centro da manta de isolamento térmico (T_{cm}). As medições foram realizadas, no dia 30 de outubro de 2009, no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

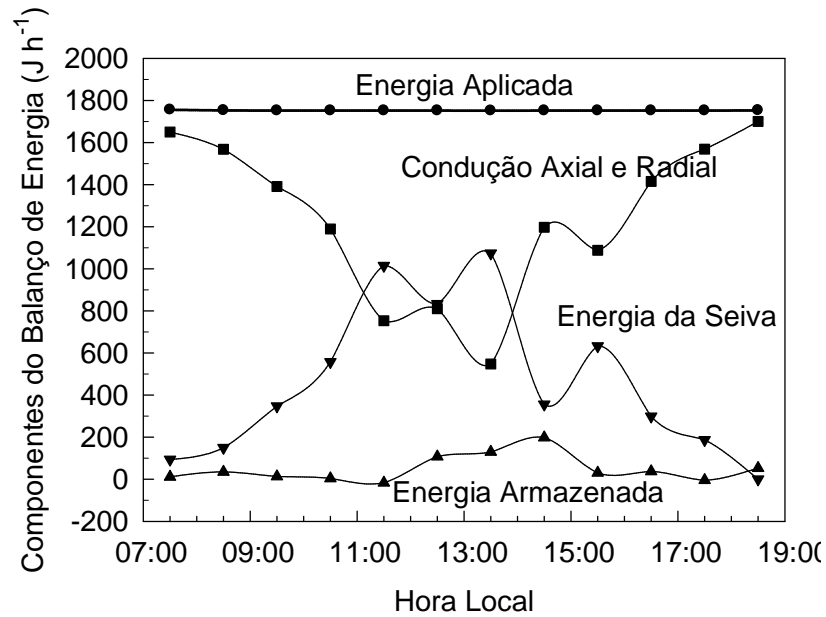


Figura 5.13. Variação horária dos componentes do balanço de energia em um segmento de caule de cana-de-açúcar, sob alterações severas das condições de nebulosidade, no dia 30 de outubro de 2009.

A transpiração determinada pela método do balanço de energia foi 10 g superior ao valor determinado pela balança de precisão entre 13 e 14 horas e 15 g inferior ao valor obtido entre 14 e 15 horas. A explicação para esse desempenho do método do balanço de energia pode ser obtida, a partir da análise do comportamento da temperatura da seiva na Figura 5.12. Com o aumento súbito da radiação, que, por sua vez, implica no aquecimento do caule situado abaixo da manta de isolamento térmico, a temperatura T_{sx} aumenta mais rapidamente que a T_{sa} e a diferença ($T_{sa} - T_{sx}$) diminui, resultando no aumento do fluxo de seiva. Em contraste, com a redução abrupta da R_g , a temperatura inferior diminuiu mais rapidamente que a da acima da fonte de calor. Na Figura 5.13, nota-se que energia

armazenada no caule não pode ser desprezada nessas condições, representando até 11% da energia elétrica aplicada.

5.2.4 Relação entre transpiração e fluxo de seiva

Na Figura 5.14 são apresentados os valores horários do fluxo de seiva obtidos pelo método do balanço de energia durante quatro dias, sob condições de céu nublado. A Figura 5.15 refere-se à mesma avaliação; no entanto, as medições foram realizadas durante quatro dias, em condições parcialmente nubladas. Os dados referentes às duas condições de nebulosidade, ou seja, nublado e parcialmente nublado, foram também avaliados conjuntamente, em escala horária, e apresentados na Figura 5.16. Em contraste, os valores diários do fluxo de seiva para todos os dias de medição, são apresentados na Figura 5.17.

Verificou-se que o método do balanço de energia apresentou desempenho satisfatório para determinação da transpiração da cana-de-açúcar, tanto em condições de céu nublado como parcialmente nublado, tendo subestimado a transpiração em apenas 3,0 e 6,5 g planta⁻¹ h⁻¹, respectivamente. Em termos percentuais, esses valores correspondem a 4 e 5% da transpiração máxima da cana-de-açúcar, em condições de céu nublado e parcialmente nublado, respectivamente. Quando as duas condições de nebulosidade são combinadas, a transpiração foi subestimada em 4,7 g planta⁻¹ h⁻¹, representando aproximadamente 3% da transpiração máxima das plantas (Figura 5.16). Esses dados se mostraram interessantes já que alguns autores observaram valores mais

elevados, quando a comparação entre métodos se deu em escalas menores.

WEIBEL; VOS (1994), trabalhando com macieira, observaram que, quando o intervalo de medição era pequeno, foram detectados erros consideráveis entre o fluxo de seiva medido pelo método do balanço de calor e a transpiração. Esses autores afirmaram que, em intervalos maiores que 24 horas, o erro é de 4%, enquanto que a curto intervalo de tempo (30 min), o erro chega a 20%. STEINBERG et al. (1989) também afirmaram que em plantas lenhosas, quando as medidas eram integradas em mais de 24 horas, o erro era menor que 4%. No entanto, o erro foi maior quando as medidas referiam-se a um período de 4 horas.

SENOCK; HAM (1993) fizeram uma comparação entre métodos de medição de transpiração em condições de laboratório e casas de vegetação, para mudas de soja com diâmetros de caule menores que 5mm. Utilizando um dispositivo para a medição do fluxo de seiva, os autores encontraram valores de transpiração constantemente menores que 5%, quando comparados com métodos de medidas gravimétricas.

TREJO-CHANDIA et al. (1997), comparando o método do balanço de energia com a transpiração medida por pesagem em três espécies de plantas, encontrou boa concordância, com cerca de 10% de erro tanto em escala diária como horária.

Quando analisada a transpiração e o fluxo de seiva em escala diária, a transpiração foi subestimada em $56,2 \text{ g planta}^{-1} \text{ d}^{-1}$, representando aproximadamente 7% da transpiração máxima das plantas (Figura 5.17). Sakuratani (1981) e Baker & Van Bavel (1987) sugerem que

erros de até 10% são aceitáveis para estimativa de evapotranspiração em plantas herbáceas. Zhang & Kirkham (1991), citado por ALVES (1999) encontraram erros da ordem de 8,8% para o fluxo de seiva do girassol, quando comparados com métodos gravimétricos.

A exatidão do método do balanço de energia também é comprovada pelos altos valores do índice de concordância “d”, que foram 0,8987; 0,9355; e 0,9432, para condições de céu nublado, parcialmente nublado e em ambas condições de nebulosidade, respectivamente. Em escala diária, esse índice foi de 0,9488. Dessa forma, os resultados sugerem que o método está adequadamente calibrado para a cana-de-açúcar, necessitando, apenas, de pequenos ajustes para medições em condições de campo.

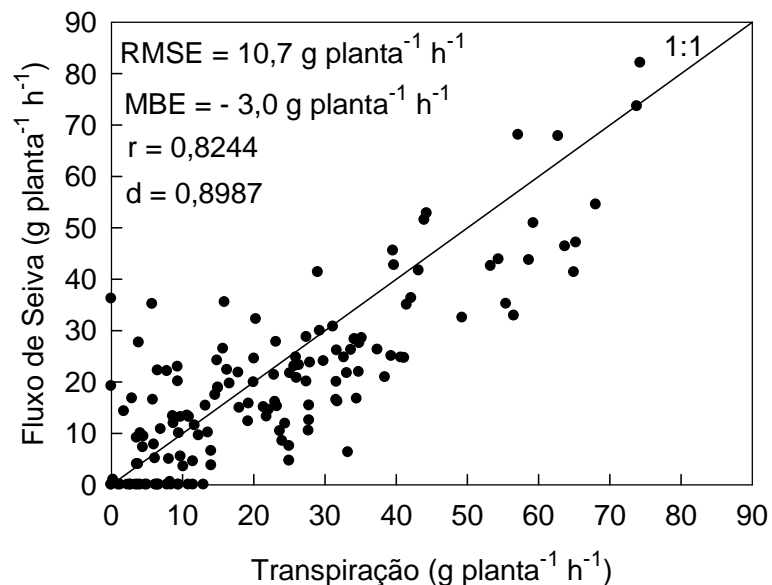


Figura 5.14. Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar, referente a medições realizadas em quatro dias nublados.

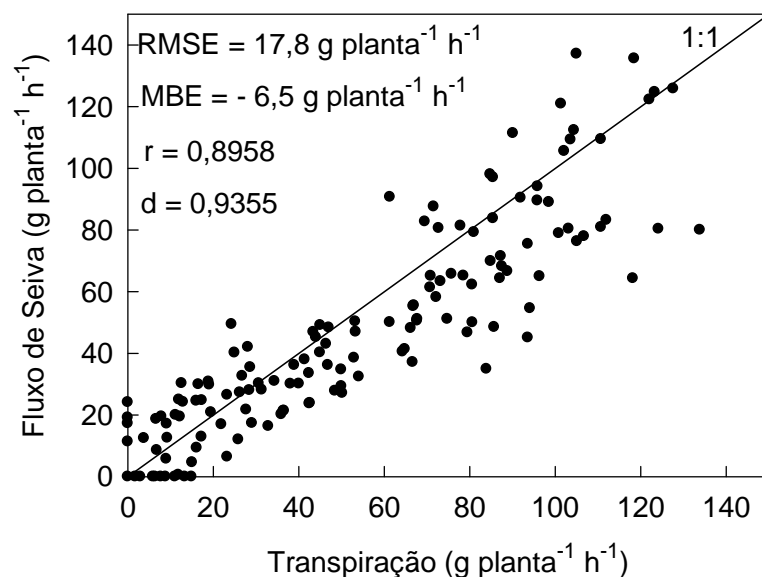


Figura 5.15. Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar, referente a medições realizadas em quatro dias parcialmente nublados.

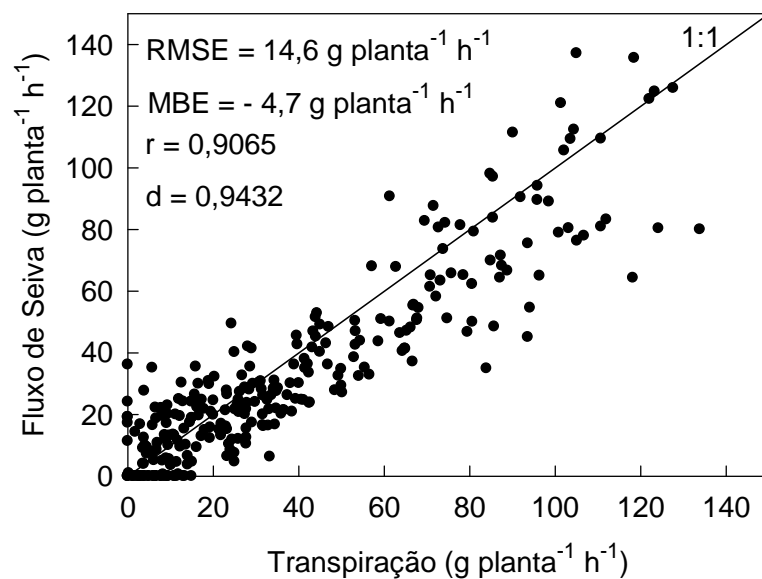


Figura 5.16. Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar, em escala horária, referente a medições realizadas em dias nublados e parcialmente nublados.

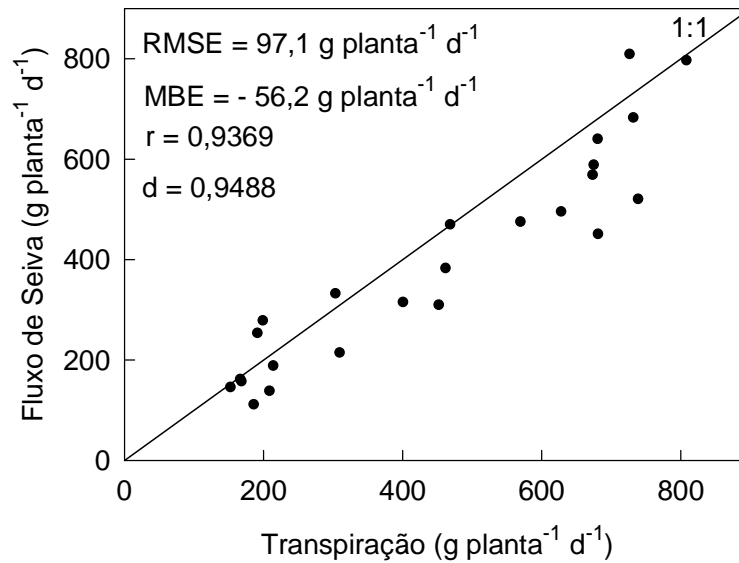


Figura 5.17. Relação entre transpiração (método gravimétrico) e fluxo de seiva (método do balanço de energia) da cana-de-açúcar, em escala diária, referente a medições realizadas em dias nublados e parcialmente nublados.

Com relação à precisão das medições, avaliadas pelo RMSE, os valores obtidos foram 10,7 e 17,8 g planta⁻¹ h⁻¹, para condições de céu nublado e parcialmente nublado, respectivamente (Fig. 5.14 e 5.15). Os valores correspondentes do coeficiente de correlação “r” foram 0,8244 e 0,8958, para condições de céu nublado e parcialmente nublado, respectivamente. Quando as duas condições de nebulosidade foram utilizadas na análise estatística, o valor do RMSE foi 14,6 g planta⁻¹ h⁻¹ e o coeficiente de correlação 0,9065. Já em escala diária, o RMSE foi 97,1 g planta⁻¹ d⁻¹ e o coeficiente de correlação 0,9369. Provavelmente, a menor precisão do método, que se refere às medições independentes, em relação à exatidão, que se refere às medições conjuntas, pode está relacionada à quantificação da energia térmica armazenada nos colmos

das plantas. As oscilações das condições de radiação afetaram a temperatura da seiva, como mostrado nas Figuras 5.4, 5.8 e 5.12.

5.2.5 Velocidade do fluxo de seiva na cana-de-açúcar

A velocidade da seiva da cana-de-açúcar para plantas com diâmetro médio do caule de 3,4 cm está apresentada nas Figuras 5.18 e 5.19, respectivamente para condições de céu parcialmente nublado e nublado, durante quatro dias distintos de medição. Os resultados de velocidade da seiva foram determinados com base nas medições de transpiração obtidas, a partir do método gravimétrico.

Em condição de céu parcialmente nublado, a velocidade máxima da seiva alcançou 14 cm h^{-1} , sendo determinada no dia 26 de outubro às 15 horas, aproximadamente. Em contraste, sob condição de céu nublado, referente ao dia 28 de outubro, o valor máximo da velocidade da seiva foi inferior a $8,0 \text{ cm h}^{-1}$. Estes valores são muito inferiores aos relatados por outros pesquisadores, como 100 cm h^{-1} para o algodão (COHEN et al., 1988) e 216 cm h^{-1} para a videira (SANTOS et al., 2005). Isso se deve ao fato de que essas culturas apresentam área foliar muito maior em relação com o diâmetro do caule, comparado com a cana-de-açúcar.

Essa particularidade da cana-de-açúcar, relacionada aos baixos valores de velocidade de escoamento da seiva, inviabilizaram a implementação do método do pulso de calor para medição da transpiração da cana-de-açúcar, utilizando a teoria clássica proposta na literatura.

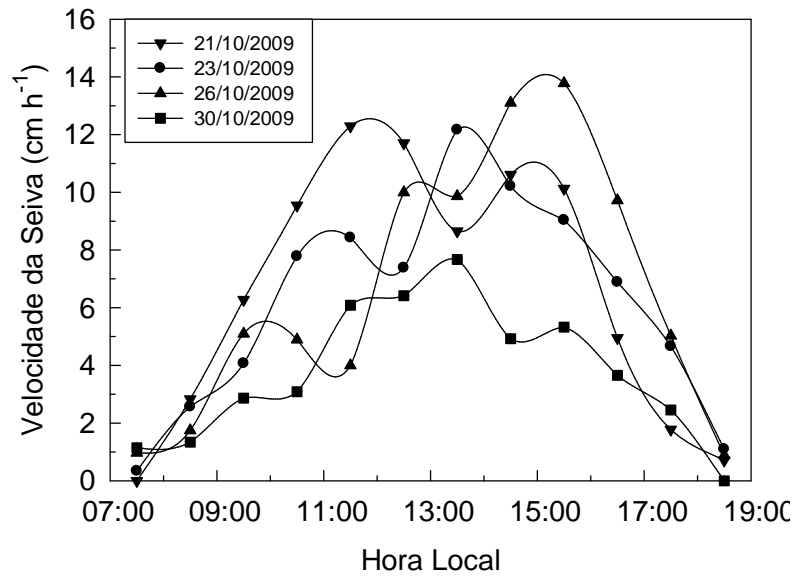


Figura 5.18. Velocidade da seiva da cana-de-açúcar para plantas com diâmetro médio do caule de 3,4 cm, obtidos com base nas medições de transpiração, a partir do método gravimétrico, em condições de céu parcialmente nublado.

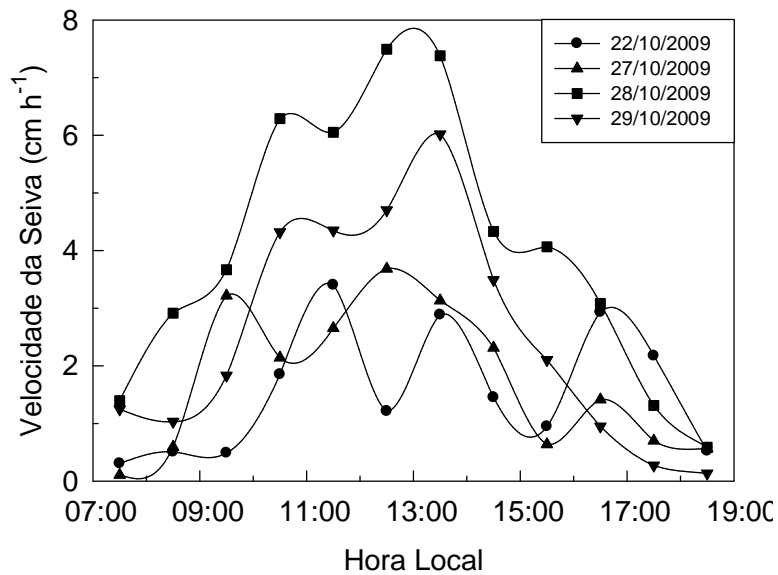


Figura 5.19. Velocidade da seiva da cana-de-açúcar para plantas com diâmetro médio do caule de 3,4 cm, obtidos com base nas medições de transpiração, a partir do método gravimétrico, em condições de céu nublado.

5.3 Método do pulso de calor

Na Figura 5.20 são apresentadas as variações típicas da radiação solar global (R_g), da temperatura do ar (T_{ar}) e do déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) sob condições de céu claro em Viçosa-MG, as quais correspondem às medições realizadas no dia 21 de abril de 2010, no interior de uma casa de vegetação não climatizada. Nesse dia, a temperatura do ar esteve compreendida na faixa situada entre 15 e 30 °C, aproximadamente, enquanto o déficit de pressão de saturação de vapor d'água oscilou de 2 a 23 hPa, respectivamente. Esses valores de T_{ar} e DPV_{ar} foram observados, quando a R_g oscilou de 0 W m⁻² no período noturno até 470 W m⁻², observada às 12 horas.

As alterações horárias da transpiração da cana-de-açúcar, correspondentes às condições meteorológicas do dia 21 de abril, estão representadas na Figura 5.21. Constatou-se que a transpiração teve comportamento parecido com o da radiação solar global. Houve aumento contínuo da transpiração no período da manhã, atingindo o máximo às 12 horas, onde se registrou perda de água do sistema de 80g planta⁻¹ h⁻¹. Em consequência da redução da radiação solar, a transpiração decresceu após o meio-dia, chegando a zero ao escurecer.

Sob condições meteorológicas do dia 30 de abril de 2010, as temperaturas da seiva da cana-de-açúcar, medida a 0,4 cm abaixo e 0,9 cm acima da fonte de aquecimento, apresentaram comportamentos diferentes nos diversos horários (Figura 5.22). Observou-se que em todos os horários houve aumento da temperatura nos primeiros minutos de cada hora, em razão do acionamento da fonte de aquecimento em um período de 7 min.

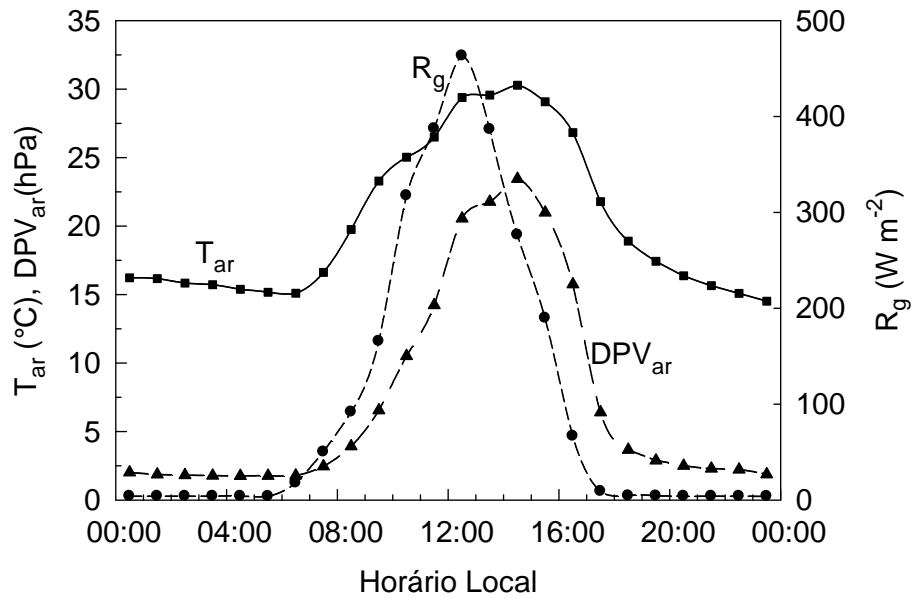


Figura 5.20. Variações típicas da radiação solar global (R_g), temperatura do ar (T_{ar}) e déficit de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), sob condições de céu claro em Viçosa-MG. As medições foram realizadas no dia 21 de abril de 2010, no interior de uma casa de vegetação não climatizada.

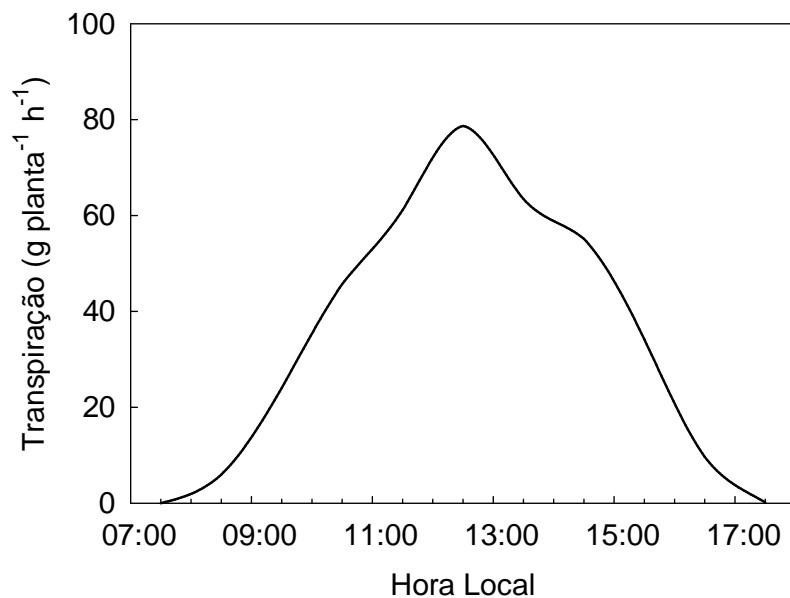


Figura 5.21. Transpiração horária da cana-de-açúcar, em condições de céu claro, no dia 21 de abril de 2010. As medições foram conduzidas simultaneamente em três plantas, utilizando-se balanças de precisão (método gravimétrico).

Quando a transpiração foi nula ou muito baixa (0 e 8 horas), a temperatura medida pelo sensor que estava abaixo da fonte de aquecimento aumentou mais rapidamente que a do que estava acima. Isso ocorreu por causa do sensor se encontrar mais próximo da fonte de aquecimento, aliado com o fato de não haver deslocamento da seiva no sentido ascendente. Já nos horários mais quentes do dia e com alta radiação (12 horas), onde a transpiração é alta, notou-se que a temperatura da seiva, 0,9 cm acima da fonte de aquecimento, comportou-se de maneira semelhante à da seiva a 0,4 cm abaixo da fonte, em decorrência do deslocamento da seiva aquecida pela fonte de aquecimento, em direção ao sensor de temperatura inserido acima do aquecedor.

Pode-se notar também que o comportamento da temperatura da seiva, após o desligamento da fonte de aquecimento, diferiu entre os horários exibidos na Figura 5.22. Assim, à 0 hora houve um declínio contínuo da temperatura da seiva em razão do resfriamento do ambiente nesse horário. Já às 8 horas, quando houve baixa incidência de radiação solar, constatou-se que a temperatura da seiva decresceu num instante inicial, mas estabilizou-se e teve um suave aumento no final do período, por causa da incidência da radiação solar nos entrenós situados abaixo do volume de controle, provocando aquecimento da seiva nessa região.

No horário das 12 horas, quando foram registrados os valores máximos de radiação solar e transpiração, a temperatura da seiva, após o desligamento da fonte de aquecimento, passou por um breve resfriamento, mas logo estabilizou-se e voltou a aumentar, em decorrência da chegada da seiva quente que estava nos entrenós expostos à radiação solar. Notou-se

que, nesse horário, a temperatura da seiva estava muito mais elevada (28 °C) do que no período da manhã (17 °C). Já às 16 horas, todo o sistema estava perdendo energia, em consequência da menor incidência de radiação solar. A temperatura acima da fonte de aquecimento diminuiu continuamente de 32 °C (término do período de aquecimento) até 30 °C.

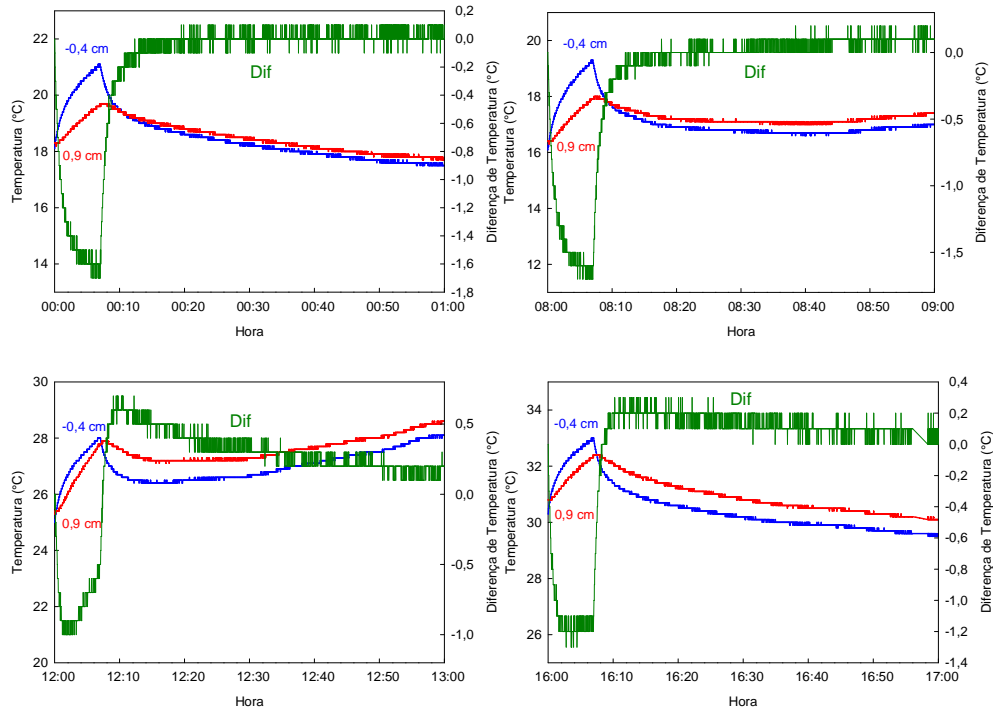


Figura 5.22. Temperaturas da seiva da cana-de-açúcar, medidas acima (0,9 cm) e abaixo (-0,4 cm) da fonte de aquecimento, e a diferença de temperatura entre elas (Dif), às 0 hora (a); às 8 horas (b); às 12 horas (c) e às 16 horas (d). As medições foram realizadas no dia 21 de abril de 2010.

A diferença entre os sensores situados acima e abaixo da fonte de aquecimento também apresentou diferenças entre os horários. No período noturno (0 horas) ou quando a transpiração foi muito baixa (8 horas), essa diferença aumentou no período em que a fonte de aquecimento esteve acionada, chegando a -1,7 °C e diminuiu assim que essa foi desligada. Já nos horários quentes do dia (12 horas), a diferença entre as temperaturas chegou

a $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, posteriormente, reduziu antes mesmo da fonte de aquecimento ser desligada. Isso ocorreu devido ao transporte de seiva aquecida em direção ao sensor de temperatura inserido acima do resistor.

6. CONCLUSÕES

As necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar, em escala horária e diária, podem ser determinadas, de forma adequada, por meio de medições do fluxo de seiva com o método do balanço de energia em um segmento de caule. No entanto, em decorrência do grande volume de seiva armazenada nos colmos e da baixa velocidade de deslocamento da seiva em comparação com outras culturas, o método do pulso de calor não pôde ser implementado por meio da metodologia clássica de aplicação de calor proposta na literatura. Somente com a aplicação de pulsos mais prolongados, em escala de minutos ao invés de segundos, foi possível detectar variações no comportamento da temperatura que pudessem ser mensuradas pelo sistema de aquisição de dados. Dessa forma, para que possa ser aplicada para a cana-de-açúcar, a teoria do método do pulso de calor precisa ser adaptada, a partir de estudos específicos. Notou-se que tanto a temperatura da seiva acima quanto a temperatura abaixo da fonte de aquecimento comportam-se de maneira distintas após a aplicação do pulso de calor, nos diversos horários do dia, respondendo às variações da transpiração para um dia de céu claro.

Foi observado também que o componente do armazenamento de calor no caule não pode ser desconsiderado no balanço de energia, como foi proposto por alguns autores para medições realizadas em outras culturas. Em razão do diâmetro expressivo dos colmos, é necessário instalar quatro termopares para obtenção da temperatura da seiva nos níveis acima e abaixo da fonte de aquecimento, sendo dois inseridos no centro e outros dois na superfície do colmo. Um termopar adicional deve

ser colocado no centro da manta de isolamento térmico, ao nível da fonte de aquecimento, para quantificação da condução axial e radial de calor.

A transpiração de plantas individuais de cana-de-açúcar foi ligeiramente subestimada pelo método do balanço de energia, em escala horária e diária, com diferenças da ordem de 4% em relação ao valor máximo de transpiração medida. Com a realização de novas pesquisas para aprimoramento desta técnica, o método do balanço de energia tem grande potencial para se tornar a técnica de referência na calibração de outros métodos utilizados para quantificação do fluxo de vapor d'água da cana-de-açúcar para a atmosfera.

7. ANEXOS

7.1 Procedimentos experimentais para instalação do sistema de medição do fluxo de seiva



Figura 1A. Limpeza do colmo da planta de cana-de-açúcar (A); revestimento da superfície do colmo com fita adesiva de alumínio (B) e desta com uma fita isolante (C); perfuração transversal do colmo da planta com uma agulha para inserção do mini-resistor (D).



Figura 2A. Início (A) e término (B) da inserção do mini-resistor no centro do colmo, juntamente com um termopar, o qual foi posicionado no centro da área revestida pelas fitas adesivas; instalação de termopares para medição da temperatura da seiva 1,5 cm acima (C) e 1,5 cm abaixo (D) da fonte de calor proporcionada pelo mini-resistor.

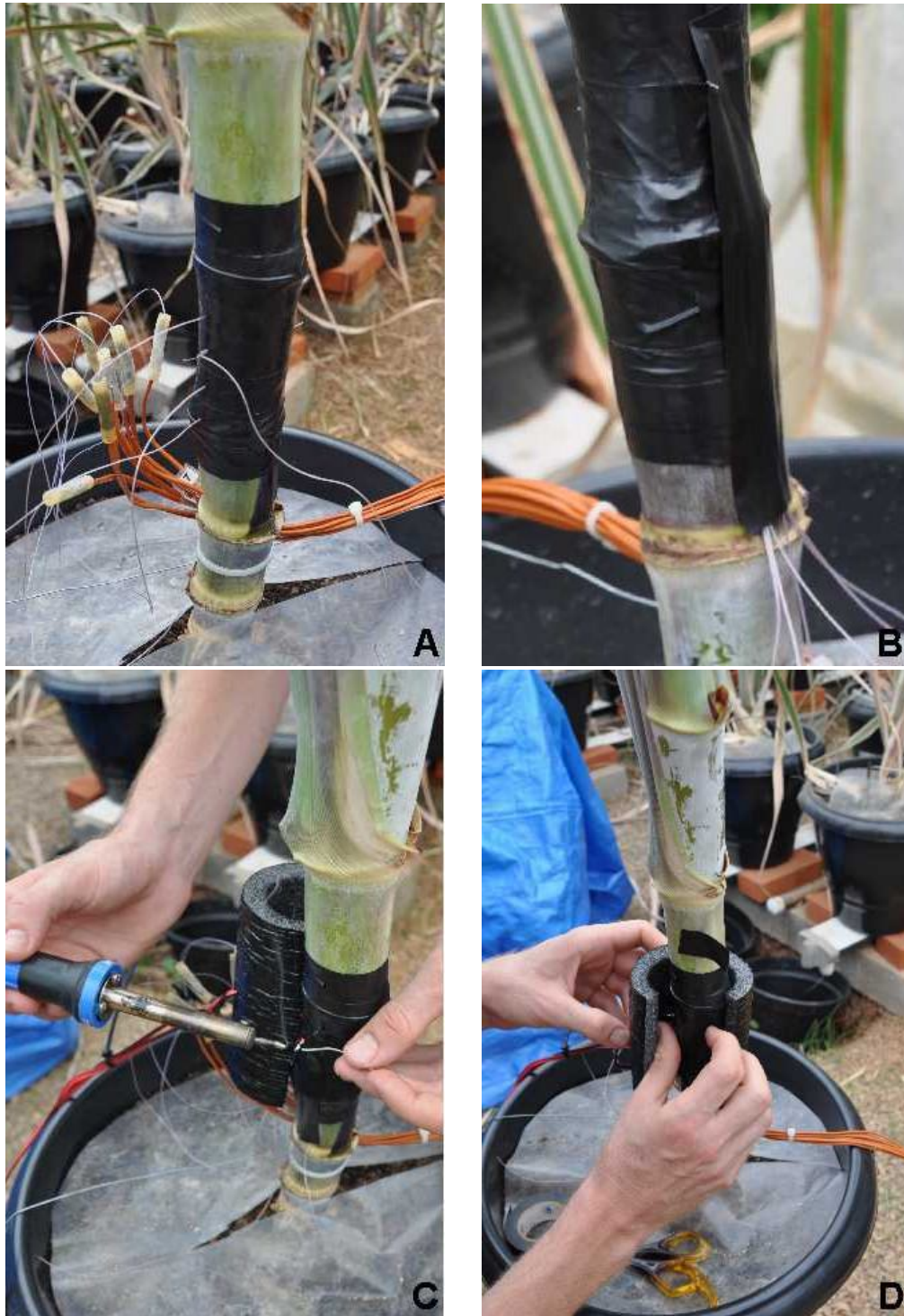


Figura 3A. Instalação de um termopar para medição da temperatura da seiva 3,0 cm abaixo da fonte de calor (A); curvatura de 90° dos termopares inseridos no centro dos colmos e colocação de três termopares adicionais sobre a superfície (B); solda do mini-resistor aos condutores elétricos da fonte de alimentação (C); colocação da 1ª camada da manta de isolamento térmico (D).



Figura 4A. Revestimento e amarração da 1ª camada da manta de isolamento térmico com uma fita isolante (A); colocação da 2ª camada da manta de isolamento térmico (B) e amarração com fita isolante (C); revestimento da manta de isolamento térmico com fita de alumínio para reflexão da radiação solar (D).



Figura 5A. Conexão dos termopares e dos condutores elétricos provenientes dos mini-resistores aos módulos de aquisição de dados para medição da temperatura da seiva e tensões elétricas aplicadas nos três sistemas de medição (A e B).

7.2 Código fonte do programa computacional (plataforma C++ Builder versão 6.0) para controle da potência elétrica aplicada nos terminais resistivos da fonte de calor e para aquisição de dados do ambiente de cultivo, temperatura da seiva e transpiração da cana-de-açúcar

```
//-----
//Programa computacional para medição da transpiração da cana-de-açúcar por
//meio de duas técnicas:
//1) Transpiração gravimétrica: transmissão de dados de massa a partir do
//protocolo RS232, utilizando-se
// as portas seriais COM3, COM4 e COM5;
//2) Fluxo de seiva: balanço de energia em um segmento do caule com medição das
//temperaturas da seiva.
// da cana-de-açúcar em pontos situados no centro e na superfície do colmo, acima
// e abaixo da fonte de
// aquecimento, e temperatura no centro da manta de isolamento térmico.
//-----
```

```
-----
//Bibliotecas da linguagem C++ Builder, versão 6.0, no ambiente WINDOWS
```

```
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include "Serial_Unit.h"
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;
```

```
//-----
```

```
//Bibliotecas Adicionais
```

```
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <excpt.h>
#include <string.h>
#include <utilcls.h>
```

```
//-----
```

```
//Declaração dos ponteiros para função.
```

```
typedef short _stdcall (*PtrInp)(short EndPorta);
typedef void _stdcall (*PtrOut)(short EndPorta, short datum);
HINSTANCE hLib; //Instância para a DLL inpout32.dll.
PtrInp inportB; //Instância para a função Imp32().
PtrOut outportB; //Instância para a função Out32().
```

```

#define LEN_BUFFER 100 //Tamanho do Buffer.
//-----
-----

//Variáveis da API
HANDLE hCom;
DCB dcb;
bool GLBEnviaDados = false;           //Para habilitar/desabilitar o envio de dados pela serial.
String StrComandos;                   //Armazena a string de comando lida da Serial.
char BufferRecebe[LEN_BUFFER]; //Buffer temporário para trabalhar direto com ReadFile().
COMMTIMEOUTS CommTimeouts;
int z_ReadIntervalTimeout;
int z_ReadTotalTimeoutMultiplier;
int z_ReadTotalTimeoutConstant;
int z_WriteTotalTimeoutMultiplier;
int z_WriteTotalTimeoutConstant;
//-----
-----

//Declaração de variáveis do sistema de aquisição de dados.
AnsiString NomeArquivo, NomeArquivo2, arquivo="iniciar";
AnsiString ss, nn, nn_old, hh, hh_old, dd, dd_old;

TDateTime TempoData;

int integracao_minuto_concluida=0, integracao_hora_concluida=0;
int x_dia=0, bb=0, s;
int contador=1;
int inicio = 0, sinalizador = 0;
int gravado=0;
int nn_old_int, nn_int;

double R_COM3, R_COM4, R_COM5, Intervalo_Tempo=10;
double      Diferencial_Pontos_3_1_COM3,      Diferencial_Pontos_3_1_COM4,
            Diferencial_Pontos_3_1_COM5;
double      Potencia_Eletrica_Atual_COM3,      Potencia_Eletrica_Atual_COM4,
            Potencia_Eletrica_Atual_COM5;
double      Tensao_Eletrica_Atual_COM3,      Tensao_Eletrica_Atual_COM4,
            Tensao_Eletrica_Atual_COM5;
double Energia_Dissipada_Minuto_COM3=0, Energia_Dissipada_Minuto_COM4=0;
double Energia_Dissipada_Minuto_COM5=0;

```

```

double Energia_Dissipada_Hora_COM3=0, Energia_Dissipada_Hora_COM4=0;
double Energia_Dissipada_Hora_COM5=0;
double dado_limpo_float;
double Modulo[256][8];
double V_Virtual[256][8], V_Total[256][8], Temperatura[256][8];
double Leitura_CJC_03, Leitura_CJC_04, Leitura_CJC_05;
double dado_b_COM3_float;
double dado_b_COM4_float;
double dado_b_COM5_float;
double FS_BC_COM3, FS_BC_COM4, FS_BC_COM5;
double Massa_COM3[2], Massa_COM4[2], Massa_COM5[2];
double Transpiracao_COM3, Transpiracao_COM4, Transpiracao_COM5;

unsigned char dado[8];
unsigned char dado_balanca[8];
unsigned char dado_limpo[]="00000000";

//-----
-----

//Abre a Porta Serial COMx
bool AbrirPorta(char *NomePorta)
{
    hCom = CreateFile(
        NomePorta,
        GENERIC_READ | GENERIC_WRITE,
        0, // dispositivos comm abertos com acesso exclusivo
        NULL, // sem atributos de segurança
        OPEN_EXISTING, // deve usar OPEN_EXISTING
        0, //Entrada e saída sem ovelap.
        NULL // hTemplate deve ser NULL para comm
    );
    if(hCom == INVALID_HANDLE_VALUE)
    {
        return false;
    }
    return true;
}

//-----
-----

```

//CONFIGURA PORTA SERIAL.

```
bool ConfiguraControle(void)
{
    if(!GetCommState(hCom, &dcb))
    {
        return false;
    }

    dcb.BaudRate = CBR_9600;
    dcb.ByteSize = 8;
    dcb.Parity = NOPARITY;
    dcb.StopBits = ONESTOPBIT;

    if( SetCommState(hCom, &dcb) == 0 )
    {
        return false;
    }
    return true;
}
```

//-----

```
-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}

```

//-----

```
-----
void __fastcall TForm1::FormCreate(TObject *Sender)
{ //Carrega a DLL na memória.
    hLib = LoadLibrary("inpout32.dll");
    if(hLib == NULL)
    {
        ShowMessage("Erro. O arquivo inpout32.DLL não foi encontrado.");
        Application->Terminate();
    }
//Obtém o endereço da função Inp32 contida na DLL.
    inportB = (PtrInp) GetProcAddress(hLib, "Inp32");
    if(inportB == NULL)
```

```

{
    ShowMessage("Erro. Erro ao endereçar a função Inp32.");
    Application->Terminate();
}
//Obtém o endereço da função Out32 contida na DLL.
outportB = (PtrOut) GetProcAddress(hLib, "Out32");
if(outportB == NULL)
{
    ShowMessage("Erro. Erro ao endereçar a função Out32.");
    Application->Terminate();
}
//Funções para identificar as portas seriais disponíveis
memset( BufferRecebe, 0, LEN_BUFFER); //Limpa o buffer.
}

//-----
-----

//função para criar um novo arquivo à meia-noite
void Verifica_Arquivo(void)
{
    if(arquivo == "iniciar")
    {
        NomeArquivo=TempoData.FormatString("hh;nn__dd_mm_yyyy")+".txt";

        Form1->RichEdit1->Clear();

        Form1->RichEdit1->Lines->Add("Data  Horario  M03_0  M03_1  M03_2  M03_3  M03_4
            M03_5  M03_6  M03_7  M03_CJC "
                "M04_0  M04_1  M04_2  M04_3  M04_4  M04_5  M04_6  M04_7
            M04_CJC "
                "M05_0  M05_1  M05_2  M05_3  M05_4  M05_5  M05_6  M05_7
            M05_CJC "
                "DIF_COM3      U_COM3      Pot_COM3      E_Min_COM3
            E_Hor_COM3 "
                "DIF_COM4      U_COM4      Pot_COM4      E_Min_COM4
            E_Hor_COM4 "
                "DIF_COM5      U_COM5      Pot_COM5      E_Min_COM5
            E_Hor_COM5 ");
    }
}

```

```

Form1->RichEdit1->Lines->Add(""+DateToStr(Date())+" hh:min:ss °C °C °C °C °C °C °C
°C °C "
                                "°C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C
°C "
                                "°C V W J J °C V W J J °C V W J J ");
arquivo = "atual";
}

if(dd_old != dd)
{
NomeArquivo = TempoData.FormatString("hh;nn__dd_mm_yyyy")+".txt";
arquivo = "novo";
x_dia=0;
}

if(arquivo == "novo")
{
Form1->RichEdit1->Clear();

Form1->RichEdit1->Lines->Add("Data Horario M03_0 M03_1 M03_2 M03_3 M03_4
M03_5 M03_6 M03_7 M03_CJC "
                                "M04_0 M04_1 M04_2 M04_3 M04_4 M04_5 M04_6 M04_7
M04_CJC "
                                "M05_0 M05_1 M05_2 M05_3 M05_4 M05_5 M05_6 M05_7
M05_CJC "
                                "DIF_COM3      U_COM3      Pot_COM3      E_Min_COM3
E_Hor_COM3 "
                                "DIF_COM4      U_COM4      Pot_COM4      E_Min_COM4
E_Hor_COM4 "
                                "DIF_COM5      U_COM5      Pot_COM5      E_Min_COM5
E_Hor_COM5 ");

Form1->RichEdit1->Lines->Add(""+DateToStr(Date())+" hh:min:ss °C °C °C °C °C °C °C
°C °C "
                                "°C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C °C
°C "
                                "°C V W J J °C V W J J °C V W J J ");
arquivo = "atual";
}
}

```

```

//-----
-----

void Modulo_7018_7017F(AnsiString End_Mod, AnsiString Canal, int Habilita_CJC)
{
    AnsiString comando;
    unsigned char caracter[2];
    int i, x, y=0;
    unsigned char caracter_int;

    AbrirPorta("COM1"); //Abre Porta Serial COM1
    ConfiguraControle(); // Configura Porta Serial
    outputB(0x000003f9, 0x00000000); //importante para não travar

    if(Habilita_CJC==0) //Leitura dos canais disponíveis no módulo
    {
        comando = "#" + End_Mod + Canal;
    }

    if(Habilita_CJC==1) //Leitura do sensor CJC
    {
        comando = "$" + End_Mod + "3";
    }

    for (int i=1; i<=comando.Length();i++)
    {
        while((inportB(0x000003fd) & 0x00000020) == 0);
        outputB(0x000003f8, Integer(comando[i]));
    }

    while((inportB(0x000003fd) & 0x00000020) == 0);
    outputB(0x000003f8, 0x0000000D); //indica
        término do comando
    dado[1]= '\0';
    caracter[1]= '\0';
    i=1;
    do
    {
        while((inportB(0x000003fd) & 0x00000001) == 0);
        caracter_int = inportB(0x000003f8);
    }
}

```

```

caracter[0] = caracter_int;
if(caracter_int != 13)
{
    strcat(dado, caracter);
}
i++;
}while(caracter_int != 13);

for(x=0;x<8;x++)
{
    if((dado[x]>=48 && dado[x]<=57) || dado[x]==46 || dado[x]==43 || dado[x]==45)
    {
        if(dado[x]== 43 || dado[x]==45)
        {
            y=0;
            dado_limpo[y]=dado[x];
            x=x+1;
            y=y+1;
        }

        if((dado[x-1]== 43 || dado[x-1]==45) && dado[x]== 48)
        {
            x=x+1;
        }

        dado_limpo[y]=dado[x];
        y=y+1;
    }
}

dado_limpo_float = atof(dado_limpo);
}

```

```
//-----
```

```
-----
```

```

void Modulo_7067D(AnsiString comando)
{

```

```

int i, x, y=0;
unsigned char caracter[2];
unsigned char caracter_int;
AbrirPorta("COM1"); //Abre Porta Serial COM1
ConfiguraControle(); // Configura Porta Serial
outportB(0x000003f9, 0x00000000); //importante para não travar
for (int i=1; i<=comando.Length();i++)
{
    while((inportB(0x000003fd) & 0x00000020) == 0);
    outportB(0x000003f8, Integer(comando[i]));
}
while((inportB(0x000003fd) & 0x00000020) == 0);
outportB(0x000003f8, 0x0000000D); //indica término do comando
dado[1]= '\0';
caracter[1]= '\0';
i=1;
do
{
    while((inportB(0x000003fd) & 0x00000001) == 0);

    caracter_int = inportB(0x000003f8);
    caracter[0] = caracter_int;

    if(caracter_int != 13)
    {
        strcat(dado, caracter);
    }
    i++;
}while(caracter_int != 13);
}

//-----
-----

void Balanca(int numero)
{
    AnsiString comando;
    unsigned char caracter_balanca[2];
    unsigned char caracter_int_balanca;
    int i, m;
    int habilita, verifica, leitura;

```

```
dado_balanca[0]= 48; //limpa todos os componentes de dado2 com zero = 48 em decimal
dado_balanca[1]= 48;
dado_balanca[2]= 48;
dado_balanca[3]= 48;
dado_balanca[4]= 48;
dado_balanca[5]= 48;
dado_balanca[6]= 48;
dado_balanca[7]= 48;
```

```
if(numero == 3) //Porta COM3
{
  AbrirPorta("COM3"); //Abre Porta Serial COM1
  ConfiguraControle(); // Configura Porta Serial
  outportB(0x0000ec01, 0x00000000);

  habilita = 0x0000ec01;
  verifica = 0x0000ec05;
  leitura = 0x0000ec00;
}
```

```
if(numero == 4) //Porta COM4
{
  AbrirPorta("COM4"); //Abre Porta Serial COM1
  ConfiguraControle(); // Configura Porta Serial
  outportB(0x0000e801, 0x00000000);

  habilita = 0x0000e801;
  verifica = 0x0000e805;
  leitura = 0x0000e800;
}
```

```
if(numero == 5) //Porta COM5
{
  AbrirPorta("COM5"); //Abre Porta Serial COM1
  ConfiguraControle(); // Configura Porta Serial
  outportB(0x0000d401, 0x00000000);

  habilita = 0x0000d401;
  verifica = 0x0000d405;
```

```

leitura = 0x0000d400;
}

dado_balanca[1]= '\0';
caracter_balanca[1]= '\0';

m=0;
i=1;
do
{
while((inportB(verifica) & 0x00000001) == 0);
caracter_int_balanca = inportB(leitura);
caracter_balanca[0] = caracter_int_balanca;

if(caracter_int_balanca != 13)
{
if((caracter_int_balanca>=48 && caracter_int_balanca<=57) ||(caracter_int_balanca ==
46 && m==0))
{
strcat(dado_balanca, caracter_balanca);
}
}

if(caracter_int_balanca == 46)
{
m=1;
}

i++;
}while(caracter_int_balanca != 13);

if(numero == 3) //Porta COM3
{
dado_b_COM3_float = atof(dado_balanca);
CloseHandle(hCom); //Fecha Porta Serial
}

if(numero == 4) //Porta COM4
{
dado_b_COM4_float = atof(dado_balanca);

```

```

CloseHandle(hCom); //Fecha Porta Serial
}

if(numero == 5) //Porta COM5
{
    dado_b_COM5_float = atof(dado_balanca);
    CloseHandle(hCom); //Fecha Porta Serial
}
}

//-----
void Calcula_Transpiracao_Gravimetrica(void)
{
    Balanca(3);
    Balanca(4);
    Balanca(5);
    do
    {
        Balanca(3);
    }while((dado_b_COM3_float<=(0.9*Massa_COM3[0]))           ||
           (dado_b_COM3_float>=(1.1*Massa_COM3[0])));

    do
    {
        Balanca(4);
    }while((dado_b_COM4_float<=(0.9*Massa_COM4[0]))           ||
           (dado_b_COM4_float>=(1.1*Massa_COM4[0])));

    do
    {
        Balanca(5);
    }while((dado_b_COM5_float<=(0.9*Massa_COM5[0]))           ||
           (dado_b_COM5_float>=(1.1*Massa_COM5[0])));

    Massa_COM3[1] = dado_b_COM3_float;
    Massa_COM4[1] = dado_b_COM4_float;
    Massa_COM5[1] = dado_b_COM5_float;
}

```

```
Transpiracao_COM3 = Massa_COM3[0] - Massa_COM3[1];
Transpiracao_COM4 = Massa_COM4[0] - Massa_COM4[1];
Transpiracao_COM5 = Massa_COM5[0] - Massa_COM5[1];
```

```
Massa_COM3[0] = Massa_COM3[1];
Massa_COM4[0] = Massa_COM4[1];
Massa_COM5[0] = Massa_COM5[1];
}
```

```
//-----
```

```
-----
```

```
void __fastcall TForm1::SegundosTimer(TObject *Sender)
```

```
{
    AnsiString End_Mod, Canal, comando, teste2;
    AnsiString b;
    int i, j;
```

```
TempoData = Now(); //Horário Atual
```

```
ss = TempoData.FormatString("ss");
nn = TempoData.FormatString("nn");
hh = TempoData.FormatString("hh");
dd = TempoData.FormatString("dd");
```

```
if(inicio == 0 && sinalizador == 0) // entra uma vez no primeiro segundo
```

```
{
    nn_old = nn;
    hh_old = hh;
    Form1->TV->Items->Item[0]->Text="Aguarde Próximo Minuto";
```

```
Balanca(3);
Balanca(4);
Balanca(5);
Massa_COM3[0] = dado_b_COM3_float;
Massa_COM4[0] = dado_b_COM4_float;
Massa_COM5[0] = dado_b_COM5_float;
sinalizador = 1;
}
```

```

if(x_dia == 0)
{
    dd_old = TempoData.FormatString("dd");
    x_dia=1;
}

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[0]->Text="Data:
        "+TempoData.FormatString("dd_mm_yyyy");
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[1]->Text="Horário:
        "+TempoData.FormatString("hh:nn:ss");

if(nn_old != nn && (ss == "00" || ss == "10" || ss == "20" || ss == "30" || ss == "40" || ss ==
        "50"))
{
    R_COM3 = 17.981; //Resistências Elétricas do Mini-Resistor;
    R_COM4 = 18.242;
    R_COM5 = 17.927;

for(j=0;j<8;j++)
{switch (j)
{case 0: Canal=0;break;
case 1: Canal=1;break;
case 2: Canal=2;break;
case 3: Canal=3;break;
case 4: Canal=4;break;
case 5: Canal=5;break;
case 6: Canal=6;break;
case 7: Canal=7;break;
}

Modulo_7018_7017F(10,Canal,0); //Módulo do Tipo 7017F: Configurado no Endereço 10
Modulo[10][j] = dado_limpo_float;
}

Modulo_7018_7017F("03",0,1); //terceiro parâmetro = 1 (leitura do CJC)
Leitura_CJC_03 = dado_limpo_float;
for(j=0;j<8;j++)
{switch (j)
{case 0: Canal=0;break;

```

```

case 1: Canal=1;break;
case 2: Canal=2;break;
case 3: Canal=3;break;
case 4: Canal=4;break;
case 5: Canal=5;break;
case 6: Canal=6;break;
case 7: Canal=7;break;
}
Modulo_7018_7017F("03",Canal,0); //Módulo do Tipo 7018: Configurado no Endereço 03
Modulo[03][j] = dado_limpo_float;
Temperatura[03][j] = Modulo[03][j];
}

```

```

Modulo_7018_7017F("04",0,1); //terceiro parâmetro = 1 (leitura do CJC)
Leitura_CJC_04 = dado_limpo_float;
for(j=0;j<8;j++)
{switch (j)
{case 0: Canal=0;break;
case 1: Canal=1;break;
case 2: Canal=2;break;
case 3: Canal=3;break;
case 4: Canal=4;break;
case 5: Canal=5;break;
case 6: Canal=6;break;
case 7: Canal=7;break;
}
Modulo_7018_7017F("04",Canal,0); //Módulo do Tipo 7018: Configurado no Endereço 04
Modulo[04][j] = dado_limpo_float;
Temperatura[04][j] = Modulo[04][j];
}

```

```

Modulo_7018_7017F("05",0,1); //terceiro parâmetro = 1 (leitura do CJC)
Leitura_CJC_05 = dado_limpo_float;
for(j=0;j<8;j++)
{switch (j)
{case 0: Canal=0;break;
case 1: Canal=1;break;
case 2: Canal=2;break;
case 3: Canal=3;break;
case 4: Canal=4;break;

```

```

case 5: Canal=5;break;
case 6: Canal=6;break;
case 7: Canal=7;break;
}
Modulo_7018_7017F("05",Canal,0); //Módulo do Tipo 7018: Configurado no Endereço 05
Modulo[05][j] = dado_limpo_float;
Temperatura[05][j] = Modulo[05][j];
}

```

```

Tensao_Eletrica_Atual_COM3 = Modulo[10][0];
Tensao_Eletrica_Atual_COM4 = Modulo[10][1];
Tensao_Eletrica_Atual_COM5 = Modulo[10][2];

```

```

Potencia_Eletrica_Atual_COM3 = pow(Tensao_Eletrica_Atual_COM3,2)/R_COM3;
Potencia_Eletrica_Atual_COM4 = pow(Tensao_Eletrica_Atual_COM4,2)/R_COM4;
Potencia_Eletrica_Atual_COM5 = pow(Tensao_Eletrica_Atual_COM5,2)/R_COM5;

```

```

Diferencial_Pontos_3_1_COM3 = Temperatura[03][3] - Temperatura[03][1];
Diferencial_Pontos_3_1_COM4 = Temperatura[04][3] - Temperatura[04][1];
Diferencial_Pontos_3_1_COM5 = Temperatura[05][3] - Temperatura[05][1];

```

//Calibração dos Termopares Instalados no Sistema COM3

```

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Text=
    "Temperatura [0] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][0],ffFixed,3,1) + " °C";

```

```

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Text=
    "Temperatura [1] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][1],ffFixed,3,1) + " °C";

```

```

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Text=
    "Temperatura [2] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][2],ffFixed,3,1) + " °C";

```

```

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[3]->Text=
    "Temperatura [3] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][3],ffFixed,3,1) + " °C";

```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[4]->Text=
    "Temperatura [4] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][4],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[5]->Text=
    "Temperatura [5] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][5],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[6]->Text=
    "Temperatura [6] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][6],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[7]->Text=
    "Temperatura [7] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[03][7],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[8]->Text=
    "Temperatura [CJC] : "
    +FloatToStrF(Leitura_CJC_03,ffFixed,3,1) + " °C";
```

//Calibração dos Termopares Instalados no Sistema COM4

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[0]->Text=
    "Temperatura [0] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][0],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[1]->Text=
    "Temperatura [1] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][1],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[2]->Text=
    "Temperatura [2] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][2],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[3]->Text=
    "Temperatura [3] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][3],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[4]->Text=
    "Temperatura [4] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][4],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[5]->Text=
    "Temperatura [5] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][5],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[6]->Text=
    "Temperatura [6] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][6],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[7]->Text=
    "Temperatura [7] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][7],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[8]->Text=
    "Temperatura [CJC] : "
    +FloatToStrF(Leitura_CJC_04,ffFixed,3,1) + " °C";
```

// Calibração dos Termopares Instalados no Sistema COM5

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Text=
    "Temperatura [0] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][0],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Text=
    "Temperatura [1] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][1],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[2]->Text=
    "Temperatura [2] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][2],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[3]->Text=
    "Temperatura [3] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][3],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[4]->Text=
    "Temperatura [4] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][4],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[5]->Text=
    "Temperatura [5] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][5],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[6]->Text=
    "Temperatura [6] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][6],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[7]->Text=
    "Temperatura [7] : "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][7],ffFixed,3,1) + " °C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Item[8]->Text=
    "Temperatura [CJC] : "
    +FloatToStrF(Leitura_CJC_05,ffFixed,3,1) + " °C";
```

// Calibração das Tensões Elétricas Medidas nos Sistemas COM3, COM4 e COM5

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[0]->Text= "Tensão [0] : "
    +FloatToStrF(Modulo[10][0], ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[1]->Text= "Tensão [1] : "
    +FloatToStrF(Modulo[10][1], ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[2]->Text= "Tensão [2] : "
    +FloatToStrF(Modulo[10][2], ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[3]->Text= "Tensão [3] : "
    +FloatToStrF(Modulo[10][3], ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[4]->Text= "Tensão [4] : "
    +FloatToStrF(Modulo[10][4], ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[5]->Text= "Tensão [5] : "
    +FloatToStrF(Modulo[10][5], ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[6]->Text= "Tensão [6] : "  
+FloatToStrF(Modulo[10][6], ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[7]->Text= "Tensão [7] : "  
+FloatToStrF(Modulo[10][7], ffFixed,3,2) + " V";
```

// Balanço de Calor : Variáveis Monitoradas no Sistema COM3

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[0]-  
>Text=  
"3,0 cm Abaixo da Manta de Isolamento Térmico: "  
+FloatToStrF(Temperatura[03][0],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[1]-  
>Text=  
"1,5 cm Abaixo do Nível da Fonte de Aquecimento: "  
+FloatToStrF(Temperatura[03][1],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[2]-  
>Text=  
"Nível da Fonte de Aquecimento: "  
+FloatToStrF(Temperatura[03][2],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Item[3]-  
>Text=  
"1,5 cm Acima do Nível da Fonte de Aquecimento: "  
+FloatToStrF(Temperatura[03][3],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[0]-  
>Text=  
"1,5 cm Abaixo do Nível da Fonte de Aquecimento: "  
+FloatToStrF(Temperatura[03][4],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[1]-  
>Text=  
"Nível da Fonte de Aquecimento: "  
+FloatToStrF(Temperatura[03][5],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Item[2]-  
>Text=
```

"1,5 cm Acima do Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[03][6],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[1]->Text=
"Temperatura da Superfície da Manta de Isolamento Térmico: "
+FloatToStrF(Temperatura[03][7],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[2]->Text=
"Diferencial [Ponto 3 - Ponto 1]: "
+FloatToStrF(Diferencial_Pontos_3_1_COM3,ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[3]->Text=
"Tensão Elétrica Atual: "
+FloatToStrF(Tensao_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed,3,2) + " V";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[4]->Text=
"Potência Elétrica Atual: "
+FloatToStrF(Potencia_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed,3,2) + " W";

// Balanço de Calor : Variáveis Monitoradas no Sistema COM4

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[0]-
>Text=
"3,0 cm Abaixo da Manta de Isolamento Térmico: "
+FloatToStrF(Temperatura[04][0],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[1]-
>Text=
"1,5 cm Abaixo do Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[04][1],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[2]-
>Text=
"Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[04][2],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[0]->Item[0]->Item[3]-
>Text=
"1,5 Acima do Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[04][3],ffFixed,3,1) + "°C";

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[0]->Item[1]->Item[0]->Text=
    "1,5 Abaixo do Nível da Fonte de Aquecimento: "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][4],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[0]->Item[1]->Item[1]->Text=
    "Nível da Fonte de Aquecimento: "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][5],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[0]->Item[1]->Item[2]->Text=
    "1,5 cm Acima do Nível da Fonte de Aquecimento: "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][6],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[1]->Text=
    "Temperatura da Superfície da Manta de Isolamento Térmico: "
    +FloatToStrF(Temperatura[04][7],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[2]->Text=
    "Diferencial [Ponto 3 - Ponto 1]: "
    +FloatToStrF(Diferencial_Pontos_3_1_COM4,ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[3]->Text=
    "Tensão Elétrica Atual: "
    +FloatToStrF(Tensao_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed,3,2) + " V";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[4]->Text=
    "Potência Elétrica Atual: "
    +FloatToStrF(Potencia_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed,3,2) + " W";
```

// Balanço de Calor : Variáveis Monitoradas no Sistema COM5

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Text=
    "3,0 cm Abaixo da Manta de Isolamento Térmico: "
    +FloatToStrF(Temperatura[05][0],ffFixed,3,1) + "°C";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Text=
```

"1,5 cm Abaixo do Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[05][1],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Text=
"Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[05][2],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[3]->Text=
"1,5 cm Acima do Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[05][3],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[0]->Text=
"1,5 cm Abaixo do Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[05][4],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[1]->Text=
"Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[05][5],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[2]->Text=
"1,5 cm Acima do Nível da Fonte de Aquecimento: "
+FloatToStrF(Temperatura[05][6],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[1]->Text=
"Temperatura da Superfície da Manta de Isolamento Térmico: "
+FloatToStrF(Temperatura[05][7],ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[2]->Text=
"Diferencial [Ponto 3 - Ponto 1]: "
+FloatToStrF(Diferencial_Pontos_3_1_COM5,ffFixed,3,1) + "°C";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[3]->Text=
"Tensão Elétrica Atual: "
+FloatToStrF(Tensao_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed,3,2) + " V";

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[4]->Text=
    "Potência Elétrica Atual: "
    +FloatToStrF(Potencia_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed,3,2) + " W";
```

```
if(ss == "50")
{
    nn_old = nn;
    gravado=0;
}
} // fim das 6 leituras: 00 10 20 30 40 50
```

```
if(nn_old != nn && gravado==0)
{
    Verifica_Arquivo();
```

```
Calcula_Transpiracao_Gravimetrica();
```

```
Energia_Dissipada_Minuto_COM3 = Potencia_Eletrica_Atual_COM3*60;
Energia_Dissipada_Minuto_COM4 = Potencia_Eletrica_Atual_COM4*60;
Energia_Dissipada_Minuto_COM5 = Potencia_Eletrica_Atual_COM5*60;
```

```
Energia_Dissipada_Hora_COM3      =      Energia_Dissipada_Hora_COM3      +
    Energia_Dissipada_Minuto_COM3;
Energia_Dissipada_Hora_COM4      =      Energia_Dissipada_Hora_COM4      +
    Energia_Dissipada_Minuto_COM4;
Energia_Dissipada_Hora_COM5      =      Energia_Dissipada_Hora_COM5      +
    Energia_Dissipada_Minuto_COM5;
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Text="Sistema de Aquisição de Dados: ";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[5]->Text=
    "Energia Elétrica Dissipada por Minuto: "
    +FloatToStrF(Energia_Dissipada_Minuto_COM3, ffFixed, 6,2) + " J";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[5]->Text=
    "Energia Elétrica Dissipada por Minuto: "
    +FloatToStrF(Energia_Dissipada_Minuto_COM4, ffFixed, 6,2) + " J";
```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[5]->Text=
    "Energia Elétrica Dissipada por Minuto: "
```

```

+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Minuto_COM5, ffFixed, 6,2) + " J";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[0]->Item[6]->Text=
"Energia Elétrica Dissipada por Hora: "
+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Hora_COM3, ffFixed, 6,0) + " J";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[1]->Item[6]->Text=
"Energia Elétrica Dissipada por Hora: "
+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Hora_COM4, ffFixed, 6,0) + " J";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Item[2]->Item[6]->Text=
"Energia Elétrica Dissipada por Hora: "
+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Hora_COM5, ffFixed, 6,0) + " J";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Text= "Fluxo de Seiva:
"
+FloatToStrF(FS_BC_COM3,ffFixed,3,1) + " g/(planta min)";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[1]->Item[2]->Text= "Fluxo de Seiva:
"
+FloatToStrF(FS_BC_COM4,ffFixed,3,1) + " g/(planta min)";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Item[2]->Item[2]->Text= "Fluxo de Seiva:
"
+FloatToStrF(FS_BC_COM5,ffFixed,3,1) + " g/(planta min)";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[0]->Item[0]->Text= "Massa: "
+FloatToStrF(Massa_COM3[1],ffFixed,5,1) + " g";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[1]->Item[0]->Text= "Massa: "
+FloatToStrF(Massa_COM4[1],ffFixed,5,1) + " g";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[2]->Item[0]->Text= "Massa: "
+FloatToStrF(Massa_COM5[1],ffFixed,5,1) + " g";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[0]->Item[1]->Text= "Transpiração: "
+FloatToStrF(Transpiracao_COM3,ffFixed, 5,1) + " g";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[1]->Item[1]->Text= "Transpiração: "
+FloatToStrF(Transpiracao_COM4,ffFixed, 5,1) + " g";

```

```
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[2]->Item[1]->Text= "Transpiração: "  
+FloatToStrF(Transpiracao_COM5,ffFixed, 5,1) + " g";
```

```
RichEdit1->Lines->Add(" "+TempoData.FormatString("hh:mm")  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][0], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][1], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][2], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][3], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][4], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][5], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][6], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[03][7], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Leitura_CJC_03, ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][0], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][1], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][2], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][3], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][4], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][5], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][6], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[04][7], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Leitura_CJC_04, ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][0], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][1], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][2], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][3], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][4], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][5], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][6], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Temperatura[05][7], ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Leitura_CJC_05, ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Diferencial_Pontos_3_1_COM3, ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Tensao_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed, 3,2)  
+" "+FloatToStrF(Potencia_Eletrica_Atual_COM3, ffFixed, 3,2)  
+" "+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Minuto_COM3, ffFixed, 6,2)  
+" "+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Hora_COM3, ffFixed, 6,0)  
+" "+FloatToStrF(Diferencial_Pontos_3_1_COM4, ffFixed, 3,1)  
+" "+FloatToStrF(Tensao_Eletrica_Atual_COM4, ffFixed, 3,2)  
+" "+FloatToStrF(Potencia_Eletrica_Atual_COM4, ffFixed, 3,2)
```

```

+" "+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Minuto_COM4, ffFixed, 6,2)
+" "+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Hora_COM4, ffFixed, 6,0)
+" "+FloatToStrF(Diferencial_Pontos_3_1_COM5, ffFixed, 3,1)
+" "+FloatToStrF(Tensao_Eletrica_Atual_COM5, ffFixed, 3,2)
+" "+FloatToStrF(Potencia_Eletrica_Atual_COM5, ffFixed, 3,2)
+" "+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Minuto_COM5, ffFixed, 6,2)
+" "+FloatToStrF(Energia_Dissipada_Hora_COM5, ffFixed, 6,0));

```

```
RichEdit1->Lines->SaveToFile(NomeArquivo);
```

```
gravado=1;
```

```
}
```

```
if(hh_old != hh && nn == "00")
```

```
{
```

```
  Energia_Dissipada_Hora_COM3 = 0;
```

```
  Energia_Dissipada_Hora_COM4 = 0;
```

```
  Energia_Dissipada_Hora_COM5 = 0;
```

```
  hh_old=hh;
```

```
}
```

```
}
```

```
//-----
```

```
-----
```

```
void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
```

```
{
```

```
  Segundos->Enabled=false;
```

```
  //CloseHandle(hCom);
```

```
  Close();
```

```
}
```

```
//-----
```

```
-----
```

```
void __fastcall TForm1::FormCloseQuery(TObject *Sender, bool &CanClose)
```

```
{
```

```
  FreeLibrary(hLib);
```

```
  //Libera memória alocada pela DLL.
```

```
}
```

```
  // Fim do Programa Computacional
```

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. L. **Desenvolvimento de um sistema de medição dos fluxos de transpiração líquida para a cultura de cana-de-açúcar a partir do fluxo de seiva.** 1999. 71p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, SP.
- ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo Sebal na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar.** 2008. 164p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa - UFV, MG.
- BAKER, J. M; VAN BAVEL, C. H. M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, v. 10, p. 777-782, 1987.
- BARBIERI, V. & VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar.** In: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional Sul, COSUL, Araras, 1977. 122 p.
- BAUERLE, W. L.; WHITLOW, T. H.; POLLOCK, C. R.; FRONGILLO, E. A. A laser-diode-based system for measuring sap flow by the heat-pulse method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.110, p.275-284, 2002.
- BURGESS, S.O.;ADAMS, M.A.; TURNER, N.C.; BEVERLY, C.R.; ONG, C.K.; KHAN, A.A.; BLEBY, T.M. An improved heat-pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. **Tree Physiology**. 21:589–598, 2001.
- CAMARA, G.M de S.; OLIVEIRA, E. A. M. de. **Produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: FEALQ, 1993. 242 p.
- CHABOT, R.; BOUARFA, S.; ZIMMER, D.; CHAUMONT, C.; DUPREZ, C. Sugarcane transpiration with shallow water-table: sap flow measurements and modelling. **Agricultural Water Management**, v.54, p.17-36, 2002.
- CHABOT, R.; BOUARFA, S.; ZIMMER, D.; CHAUMONT, C.; MOREAU, S. Evaluation of the sap flow determined with a heat balance method to measure the transpiration of a sugarcane canopy. **Agricultural Water Management**, v.75, p.10-24, 2005.
- CHANDRA, S.; LINDSEY, P.A; BASSUK, N.L. A gauge to measure the mass flow rate of water in trees. **Plant, Cell and Environment**, v.18, p.463-469, 1994.
- COHEN, Y.; FUCHS, M.; FALKENFLUG, V.; MORESHET, S. Calibrated heat pulse method for determining water uptake in cotton. **Agronomy Journal**, v.80, p.398-402, 1988.

COHEN, Y.; HUCK, M.G.; HESKETH, J.D.; FREDERICK, J.R. Sap flow in the stem of water stressed soybean and maize plants. **Irrigation Science**, n.11, p.45-50, 1990.

COHEN, Y.; TAKEUCHI, S.; NOZAKA, J.; YANO, T. Accuracy of sap flow measurement using heat balance and heat pulse methods. **Agronomy Journal**, v.85, p.1080-1086, 1993.

COHEN, Y.; LI, Y. Validating sap flow measurement in field-grown sunflower and corn **Journal of Experimental Botany**, v.47, n.304, p.1699-1707, 1996.

DUGAS, W.A.; WALLACE, J.S.; ALLEN, S.J.; ROBERTS, J.M. Heat balance, porometer and deuterium estimates of transpiration from potted trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 64, p. 47-62, 1993.

DOOREMBOS, J. & KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**, Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. (Estudos FAO – Irrigação e Drenagem, 33, traduzido por Gheyi, H.R. et al.).

FORTES, C. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7**. 2003. 131p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, SP.

GIORIO, P.; GIORIO, G. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. **Environmental and Experimental Botany**, v. 49, p. 9-20, 2003.

GRIME, V. L.; MORISON, J. I. L.; SIMMONDS, L. P. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.74, p.1-25, 1995.

GRIME, V. L.; SINCLAIR, F. L. Sources of error in stem heat balance sap flow measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.94, p.103-121, 1999.

GOMIDE, R. L.; DURÃES, F. O. M.; KOBAYASHI, M. K.; MACHADO, R. A. F. Caracterização de estresse hídrico de duas linhagens de milho (*Zea mays* L.) com sondas de fluxo de seiva. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, MG, v.4, n.3, p.344-354, 2005.

GROOT, A.; KING, K. M. Measurement of sap flow by the heat balance method: numerical analysis and application to coniferous seedlings. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.59, p. 289-308, 1992.

HAM, J. M.; HEILMAN, J.L. Dynamics of heat balance stem flow gauge during high flow. **Agronomy Journal**, v.82, p.147-152, 1990.

IBGE - Sistema de Recuperação Automática – SIDRA. Disponível em: <
<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp?t=5&z=t&o=11&u1=1&u2=1&u3=1&u4=1&u5=1&u6=1>>. Acesso em 15 de dezembro de 2010.

IGBADUN, H. E.; MAHOO, H. F.; TARIMO, A. K. P. R.; SALIM, B. A. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. **Agricultural Water Management**, v.85, p.141-150, 2006.

JACOVIDES, C.P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, v. 27, p. 365-371, 1995.

JALOTA, S.K.; SOOD, A.; CHAHAL, G.B.S.; CHOUDHURY, B.U. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. **Agricultural Water Management**, v.84, p.137–146, 2006.

INMAN-BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.36, n.1, p.41-51, 1994.

LOTT, J. E.; KHAN, A. A. H.; ONG, C. K.; BLACK, C. R. Sap flow measurements of lateral tree roots in agroforestry systems. **Tree Physiology**, v.16, p.995-1001, 1996

MACHADO, E. C.; OLIVEIRA, R. F.; RIBEIRO, R. V.; MEDINA, C. L.; STUCHI, E. S.; MARIN, F. R.; SILVA, J. A. B.; SILVA, S. R. Fluxo de seiva e fotossíntese em laranja 'Natal' com clorose variegada dos citros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p.911-918, 2006.

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. Fluxo de seiva e evapotranspiração num pequeno pomar de citros irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.2, p.219-226, 2001.

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

MILLER, D. R.; VAVRINA, C. A.; CHRISTENSEN, T. W. Measurement of sap flow and transpiration in ring porous oaks using a heat-pulse velocity technique. **Forest Science**. v.26, n.3, p. 485-494, 1980.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011**. 2. ed. rev. Brasília, DF: Secretaria de Produção e Agroenergia/MAPA, Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110 p.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. 7ª ed. Ed. Nobel, São Paulo, 1987.

PINTO, N. S. L.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda., 1976.

RAJAK, D.; MANJUNATHA, M.V.; RAJKUMAR, G.R.; HEBBARA, M.; MINHAS, P.S. Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol. **Agricultural Water Management**, v.83, p.30-36, 2006.

ROJAS, J. S. D.; ANGELOCCI, L. R.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO FILHO, M. A. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n°2, p 404-413, 2007.

ROJAS, J. S. D. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação**. 2003. 110p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, SP, 2003.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.37, p.9-17, 1981.

SANTOS, A. J. **Micrometeorologia de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**. 2001. 91p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas –UFAL, Maceió, AL.

SANTOS, A. O.; ADÃO, F. M. R. B.; HERNANDEZ, J. L.; ORLANDO, T. das G. S. Determinação do fluxo de seiva em videira através da técnica do pulso de calor. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, n.2, p.262-272, 2005.

SANTOS, A. O.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G.; BERGONCI, J. I.; RADIN, B. Assessment of corn water uptake based on sap heat tracing under water-stressed conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.2, p.145-149, 1999.

SENOCK, R. S.; HAM, J. M. Heat balance sap flow gauge for small diameter stems. **Plant, Cell and Environment**, v.16, p. 593-601, 1993.

SHACKEL, K. A.; JOHNSON, R.S.; MEDAVAR, C.K; PHENE, C. J. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, p.351-356, 1992.

STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S.; MAROUELLI, W. A.; CARRIJO, O. A.; MARTINEZ, H. E. P. Avaliação de um circuito eletrônico para medição

da condutividade elétrica de soluções nutritivas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal – SP, v.25, n.2, p.427-435, 2005.

STEINBERG, S.; VAN BAVEL, C.H.M.; McFARLAND, M.J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.114, p.466-472, 1989.

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.

SMITH, D. M.; ALLEN, S. J. Measurement of sap flow in plant stems. **Journal of Experimental Botany**, v.47, n.305, p.1833-1844, 1996.

SWANSON, R. H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.72, p.113-132, 1994.

SWANSON, R. H.; WHITFIELD, D. W. A. A numerical-analysis of heat pulse velocity theory and practice. **Journal of Experimental Botany**, v.32, p.221-239, 1981.

TEJERA, N.A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative análisis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v. 103, p.64-72, 2007.

TREJO-CHANDIA, J. E.; ANGELOCCI, L. R.; OLIVEIRA, R. F. de. Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. **Scientia Agrícola**, v.54, n.3, 1997. Disponível em: www.scielo.br. Acesso realizado em 13 de fevereiro de 2007.

VERTUAN, C. A; **Fluxos de transpiração de três variedades de cana-de-açúcar sob altas condições de demanda hídrica**. 2003. 146p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, SP.

WEIBEL, F.P.; VOS, J.A.de. Transpiration measurements in apple trees: an improved stem balance heat method. **Plant and Soil**, v.166, p.203-217, 1994.

WULLSCHLEGER, S. D.; MEINZER, F. C.; VERTESSY, R. A. A review of whole-plant water use studies in trees. **Tree Physiology**, v.18, p.499-512, 1998.

ZOLNIER, S. **Automação de sistemas de cultivo em substrato**. In: IV Encontro Nacional sobre Substrato para Plantas. Viçosa, Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, p. 158-189, 2004.

ZOLNIER, S.; GATES, R. S.; GENEVE, R. L.; BUXTON, J. W.
Evapotranspiration-based misting control for poinsettia propagation.
Transactions of the ASAE, v. 46, n.1, p.135-145, 2003.