

ROBERTO TRENTIN

**ESTIMATIVA DE UM ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DA
CANA-DE-AÇÚCAR COM BASE NA TEMPERATURA FOLIAR**

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 UFRV**

T

T795e
2010

Trentin, Roberto, 1983-

Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar / Roberto Trentin. – Viçosa, MG, 2010.

xviii, 61f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Sérgio Zolnier.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 55-61.

1. Meteorologia agrícola. 2. Cana-de-açúcar - Irrigação. 3. Cana-de-açúcar - Fatores climáticos. 4. Cana-de-açúcar - Efeito do stress. 5. Cana-de-açúcar - Necessidades de água. 6. Folhas - Efeito da temperatura. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 630.2515

ROBERTO TRENTIN

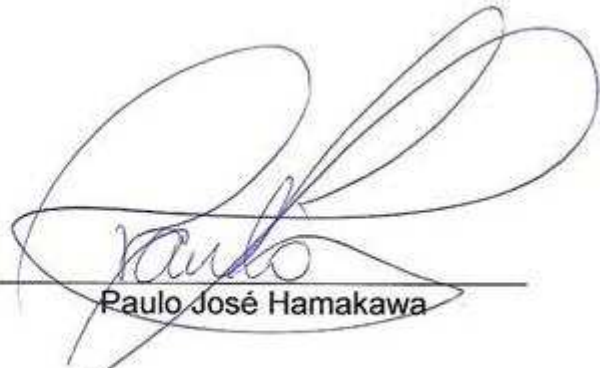
**ESTIMATIVA DE UM ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DA
CANA-DE-AÇÚCAR COM BASE NA TEMPERATURA FOLIAR**

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*.

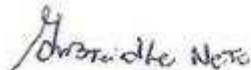
APROVADA: 24 de fevereiro de 2010.



Thieres George Freire da Silva



Paulo José Hamakawa



Antonio José Steidle Neto
(Coorientador)



Aristides Ribeiro
(Coorientador)



Sérgio Zolnier
(Orientador)

Aos meus pais, João e Lúdia,
pelo amor, pela dedicação incondicional,
pelo incentivo e pelo exemplo de vida.

Ao meu irmão Gustavo,
pelo incentivo, pela força e pela amizade.

“Conhece-te a ti mesmo”.
Sócrates (filósofo grego, 470 a.C.–399 a.C.)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conduzir com sabedoria nos momentos difíceis, por me dar força interior para superar as dificuldades, por mostrar o caminho nas horas incertas e por me suprir em todas as minhas necessidades.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo e pelo apoio financeiro para execução do experimento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para execução do experimento.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor Sérgio Zolnier, pela orientação, pela competência, pelos ensinamentos, pelo estímulo e pela amizade.

Aos professores Aristides Ribeiro e Antonio José Steidle Neto, pelas críticas construtivas, pelas sugestões apresentadas e pela amizade.

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

À turma da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pelos muitos momentos de convivência e companheirismo. Em especial, a Thieres e Davi, pelo constante incentivo, pelas sugestões e pelas dicas para o trabalho.

Aos meus amigos de república Odilon e Thiago, pelos momentos de alegria, pela descontração, pelo companheirismo e pela convivência na mesma casa durante minha permanência em Viçosa.

Aos meus amigos de Viçosa, Cleber, Fabrina, Gládis e Vanessa que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos professores Galileo Adeli Buriol, Arno Bernardo Heldwein e Nereu Augusto Streck, pela amizade, pelo apoio e pelos conhecimentos transmitidos durante a minha Iniciação Científica.

Aos amigos Fábio Schreiber e Juliano Rodrigo Ramon, pela nossa grande amizade que, apesar da distância, permanece forte.

A todos aqueles que, embora não mencionados, sabem que contribuíram em alguma etapa do meu mestrado e da minha vida.

BIOGRAFIA

ROBERTO TRENTIN, filho de João Trentin e Lúcia Téo Trentin, nasceu em 23 de outubro de 1983, na cidade de Chapecó, SC.

Em 2002, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria, RS, graduando-se em setembro de 2007.

Em março de 2008, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, em nível de Mestrado, com área de concentração em Interação Planta-Ambiente, submetendo-se à defesa da dissertação em 24 de fevereiro de 2010.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. A cultura da cana-de-açúcar	3
2.1.1. Variáveis climáticas	3
2.1.1.1. Radiação solar	3
2.1.1.2. Fotoperíodo	4
2.1.1.3. Temperatura	4
2.1.1.4. Disponibilidade hídrica	5
2.2. Temperatura foliar como indicador de estresse hídrico das cul- turas	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	10

	Página
3.1. Cultivo de cana-de-açúcar em casa de vegetação	10
3.2. Determinação da curva de retenção de água do substrato	14
3.3. Medição das variáveis micrometeorológicas	15
3.4. Monitoramento da transpiração e temperatura foliar	16
3.5. Graus dias acumulados	18
3.6. Monitoramento biométrico	18
3.7. Desenvolvimento teórico do índice de estresse hídrico	20
3.8. Limites experimentais do domínio de temperatura " t_c-t_{ar} " para determinação do índice de estresse hídrico da cana-de-açúcar	22
3.9. Estimativa da diferença (t_c-t_{ar}) a partir de dados de R_g e DPV_{ar}	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Variáveis meteorológicas mensuradas durante o período de cultivo da cana-de-açúcar no interior da casa de vegetação	26
4.2. Curva característica de retenção de água no substrato	27
4.3. Análise de crescimento da cultura da cana-de-açúcar	28
4.4. Experimentos com diferentes níveis de tensão de água no substrato	30
4.4.1. Ausência de estresse hídrico	31
4.4.1.1. Comportamento da temperatura foliar da cana-de-açú- car, sob ausência de estresse hídrico, em função de alterações das condições meteorológicas no ambiente de cultivo	31
4.4.1.2. Comportamento da transpiração e da diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) durante o período diurno sob au- sência de estresse hídrico	33
4.4.1.3. Linha-base em ausência de estresse hídrico	34
4.4.2. Estresse hídrico moderado	38

4.4.2.1. Comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar, sob estresse hídrico moderado, em função de alterações das condições meteorológicas no ambiente de cultivo	38
4.4.2.2. Comportamento da transpiração e da diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) durante o período diurno sob estresse hídrico moderado	40
4.4.2.3. Linha-base sob condições de estresse hídrico moderado	42
4.4.3. Estresse hídrico severo	42
4.4.3.1. Comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar, sob estresse hídrico severo, em função de alterações das condições meteorológicas no ambiente de cultivo	42
4.4.3.2. Comportamento da transpiração e da diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) durante o período diurno sob estresse hídrico severo	45
4.4.3.3. Linha-base sob condições de estresse hídrico severo ..	47
4.5. Índice de estresse hídrico para a cultura de cana-de-açúcar	50
5. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	55

LISTA DE FIGURAS

		Página
1	Vista interna da casa de vegetação, localizada na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencente à Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG ...	11
2	Vista parcial do cultivo da cana-de-açúcar em substrato comercial acondicionado em vasos plásticos sob condições de casa de vegetação	12
3	Armazenamento da solução nutritiva em vasos plásticos, após o seu escoamento em perfis hidropônicos posicionados abaixo dos vasos de cultivo	13
4	Detalhe do micro-tubo do sistema de irrigação e da cobertura da superfície do substrato para minimizar a evaporação d'água	14
5	Vista parcial do tubo de PVC aspirado onde foi instalado internamente o sensor de temperatura e umidade relativa do ar. Na parte externa foram fixados o piranômetro e o anemômetro de fio quente	16
6	Sistemas individuais de pesagem para medição da transpiração de plantas de cana-de-açúcar	17
7	Medição da temperatura foliar da cana-de-açúcar com um termômetro a infravermelho	18

8	Distribuição dos vasos de cultivo, balanças e plantas selecionadas para monitoramento biométrico no interior da casa de vegetação	19
9	Domínio experimental da diferença de temperatura " t_c-t_{ar} " em função do déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar})	24
10	Variação dos valores de irradiância solar global diária (R_g), déficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) e da velocidade do ar (U) (a) e dos valores médios da temperatura do ar (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR) (b) ao longo do ciclo de crescimento da cultura de cana-de-açúcar, expresso em dias após o plantio (DAP)	27
11	Curva característica de retenção de água do substrato ajustada pelo método de Van Genuchten (1980) e equação de determinação da umidade do substrato (Θ)	29
12	Estatuta média dos colmos (EMC) e área foliar (AF) da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), em função de graus-dia acumulados após o plantio (GDA)	30
13	Variação diurna da temperatura foliar (t_c) para cultura de cana-de-açúcar (cultivar RB867515) e temperatura do ar (t_{ar}), radiação solar incidente (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para 122, 150 e 185 dias após o plantio (DAP), em ausência de estresse hídrico	32
14	Valores horários de transpiração (Tr) e diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) correspondente para cana-de-açúcar (cultivar RB867515) em 122, 150 e 185 dias após o plantio, com níveis de tensão matricial de 0,01, 0,18 e 0,07 bar, respectivamente, sob ausência de estresse hídrico	35
15	Relações entre a diferença de temperatura t_c-t_{ar} e o déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar}), para a cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob ausência de estresse hídrico e diferentes faixas de radiação solar global incidente (R_g)	36
16	Diferença de temperatura t_c-t_{ar} em função do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar}) e da radiação solar global incidente (R_g), para a cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob ausência de estresse hídrico	37

17	Valores horários da temperatura foliar (t_c) da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), temperatura do ar (t_{ar}), radiação solar global incidente (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para 126, 154 e 187 dias após o plantio (DAP), sob condições de estresse hídrico moderado ..	39
18	Valores horários de transpiração (Tr) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) correspondente para cana-de-açúcar (cultivar RB867515), em 126, 154, e 187 dias após o plantio, com tensões matriciais de 4,74, 6,65 e 5,35 bars, respectivamente, sob estresse hídrico moderado	41
19	Relações entre a diferença de temperatura cultura-ar ($t_c - t_{ar}$) e o déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para a cultura da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob estresse hídrico moderado (tensão: 4 a 6 bars) e duas faixas de radiação solar incidente (R_g)	43
20	Valores horários de temperatura foliar (t_c) da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), temperatura do ar (t_{ar}), radiação solar global incidente (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para 128, 156 e 191 dias após o plantio (DAP), sob condições de estresse hídrico severo	44
21	Valores horários de transpiração (Tr) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) correspondente para cana-de-açúcar (cultivar RB867515), em 128, 156 e 191 dias após o plantio, com tensões matriciais de 12,72, 13,32 e 11,68 bars, respectivamente, sob estresse hídrico severo	46
22	Relações entre a diferença de temperatura cultura-ar ($t_c - t_{ar}$) e o déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para a cultura da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob estresse hídrico severo (tensão > 11 bars) e duas faixas de radiação solar incidente (R_g)	48
23	Representação gráfica do domínio da diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$ em função do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar})	51
24	Representação gráfica do domínio da diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$, em função do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar}), para três níveis de radiação solar global incidente (R_g)	52

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

α	Albedo, adimensional
AF	Área foliar (cm ²)
c_p	Calor específico do ar (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
C	Comprimento da folha (cm)
CE	Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)
γ	Constante psicrométrica (Pa °C ⁻¹)
CWSI	Crop Water Stress Index
Δ	Declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água no ar (Pa °C ⁻¹)
DPV _{ar}	Déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar (Pa; hPa; kPa)
ρ_{ar}	Densidade do ar (kg m ⁻³)
DAP	Dias após plantio
$t_c - t_{ar}$	Diferença de temperatura cultura-ar (°C)
EMC	Estatura média dos colmos (cm)
LE	Fluxo de calor latente (W m ⁻²)
G	Fluxo de calor no solo (W m ⁻²)
H	Fluxo de calor sensível (W m ⁻²)
GDA	Graus-dia acumulados (°C d ⁻¹)
IEHC	Índice de estresse hídrico para a cultura
L	Largura da folha (cm)

$(t_c - t_{ar})_{LBI}$	Linha base em ausência de estresse hídrico, Linha base inferior
$(t_c - t_{ar})_{LBS}$	Linha base em estresse hídrico severo, Linha base superior
$\overline{(t_c - t_{ar})}$	Média da diferença de temperatura cultura-ar (°C)
a	Parâmetro da linha base em ausência de estresse hídrico
b	Parâmetro da linha base em ausência de estresse hídrico
R_g	Radiação solar incidente ($W\ m^{-2}$; $MJ\ d^{-1}$)
r_h	Resistência à transferência de calor sensível por convecção ($s\ m^{-1}$)
r_c	Resistência de superfície à transferência de calor latente ($s\ m^{-1}$)
R_n	Saldo de radiação ($W\ m^{-2}$)
t_c	Temperatura da cultura (°C)
t_{ar}	Temperatura do ar (°C)
Ψ	Tensão de água no substrato (bar)
Tr	Transpiração foliar ($g\ h^{-1}\ planta^{-1}$)
Θ	Umidade do substrato (% em massa)
UR	Umidade relativa do ar (%)
U	Velocidade do ar ($m\ s^{-1}$)

RESUMO

TRENTIN, Roberto, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010.
Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura do dossel vegetativo. Orientador: Sérgio Zolnier. Coorientadores: Aristides Ribeiro e Antonio José Steidle Neto.

Este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento da temperatura foliar e da transpiração da cana-de-açúcar sob diferentes tensões matriciais do substrato de cultivo e condições meteorológicas, visando à estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura (IEHC), o qual pode ser aplicado no manejo de irrigação e em estimativas de produtividade. Em decorrência da necessidade de aplicação de estresse hídrico às plantas, o experimento foi conduzido em uma casa de vegetação, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Os toletes de cana-de-açúcar (cv. RB867515) foram plantados no dia 06/05/2009, em vasos plásticos com capacidade para 10 litros, os quais foram preenchidos com um substrato comercial. No total, 192 plantas foram cultivadas durante 6 meses no interior da casa de vegetação, mas apenas uma parcela foi utilizada nas medições. Para avaliar o efeito da disponibilidade de água na temperatura foliar e transpiração, sob diferentes condições meteorológicas, foram

estabelecidas três classes de tensão de água (Ψ) no substrato de cultivo: ausência de estresse hídrico ($\Psi < 0,5$ bar), estresse hídrico moderado ($4,0 < \Psi < 6,0$ bars) e severo ($\Psi > 11,0$ bars). Um sistema de aquisição de dados meteorológicos foi implementado para medição da radiação solar global (R_g), velocidade do ar (U), umidade relativa do ar (UR), temperatura do ar (t_{ar}) e transpiração individual de três plantas escolhidas ao acaso. Adicionalmente, a temperatura foliar (t_c) foi obtida a partir do posicionamento de um termômetro a infravermelho em três pontos distintos de cada uma das plantas utilizadas nas medições de transpiração. Com base em medições realizadas sob ausência de estresse hídrico, foi constatado que a temperatura foliar acompanhou as oscilações da radiação solar causadas por condições de céu parcialmente nublado. Em geral, a t_c foi inferior a t_{ar} em condições de ausência de estresse hídrico, com diferença máxima de 6°C . O efeito do estresse hídrico na temperatura foliar e na transpiração foi determinado a partir da suspensão da irrigação, quando foram realizadas três campanhas de medições, iniciadas aos 122, 150 e 181 dias após o plantio, com intervalos de dois dias, até que a tensão matricial no substrato alcançasse 15 bars. Em condições de estresse hídrico severo, a t_c chegou a ser $6,8^\circ\text{C}$ superior a t_{ar} . Por meio de análises de regressões, foram estabelecidas relações entre a diferença $t_c - t_{ar}$ e as variáveis radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de vapor d'água (DPV_{ar}), visando à determinação dos parâmetros necessários para obtenção do IEHC.

ABSTRACT

TRENTIN, Roberto, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010.
Estimating of crop water stress index to sugarcane based on the canopy temperature. Adviser: Sérgio Zolnier. Co-advisers: Aristides Ribeiro and Antonio José Steidle Neto.

The objective of this work was to evaluate the behavior of leaf temperature and transpiration of sugarcane under different matric and meteorological conditions to estimate a crop water stress index (IEHC), which can be applied in irrigation management and estimates of productivity. Because of the need to apply water stress to plants, the experiment was conducted in a greenhouse, belonging to the Agricultural Engineering Department at the Federal University of Viçosa, Viçosa, MG, Brazil. Bud chips of sugarcane (cv. RB867515) were planted on May 6, 2009, in plastic pots with a capacity of 10 liters, which were filled with a commercial substrate. In total, 192 plants were grown for 6 months within the greenhouse, but only a portion was used in measurements. To evaluate the effect of water availability on leaf temperature and transpiration, under different meteorological conditions, three classes of water tension (Ψ) were maintained in the substrate: no water stress ($\Psi < 0,5$ bar), moderate ($4,0 < \Psi < 6,0$) and severe ($\Psi > 11,0$ bars) water stress. A meteorological data acquisition system was implemented for measuring global

solar radiation (R_g), air velocity (U), air relative humidity (UR), air temperature (t_{ar}) and transpiration of three individual plants randomly chosen. In addition, leaf temperature (t_c) was obtained by positioning an infrared thermometer at three different points of each plant used in the transpiration measurements. Based on the measurements obtained without water stress, it was found that the leaf temperature followed fluctuations of solar radiation caused by conditions of partly cloudy sky. In general, t_c was lower than t_{ar} under no water stress conditions, with maximum difference of 6°C. The effect of water stress on leaf temperature and transpiration was determined from the suspension of irrigation, by performing three measurement campaigns, initiated at 122, 150 and 181 days after planting, with two days intervals, until the water tension in the substrate reached 15 bars. Under severe water stress conditions, t_c became 6.8°C higher than t_{ar} . By using regression analysis, relations were established between the differential $t_c - t_{ar}$ and the variables global solar radiation (R_g) and air water vapor pressure deficit (DPV_{ar}), in order to determine the parameters necessary for obtaining the IEHC.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar reveste-se de grande importância socioeconômica, visto que é utilizada como matéria-prima para produção de duas commodities nacionais de considerável magnitude e peso na balança comercial nacional: o açúcar e o álcool. Este último, ainda mais em evidência, devido à possibilidade de escassez dos combustíveis fósseis que preocupa o mundo moderno, altamente dependente de energia para sobreviver (ARGENTON, 2006).

A procura por fontes de energia renováveis e menos poluentes traz incentivos para o aumento de produtividade da cana-de-açúcar, já que o álcool é uma fonte de energia alternativa e contribui para a redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na atmosfera terrestre. A emissão de gases gerados pela combustão do álcool é compensada pela fixação de CO₂ durante o período de cultivo da cana-de-açúcar (BRASIL, 2005).

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar é uma das mais importantes do agronegócio, não só pelo seu elevado destaque no contexto brasileiro e internacional, mas também pelas perspectivas de crescimento (RODRIGUES, 2006). O Brasil destaca-se no cenário mundial como o maior produtor de cana-de-açúcar, possuindo cerca de 8,5 milhões de hectares cultivados. Em decorrência disso, o segmento fatura, direta e indiretamente, cerca de US\$ 87 bilhões por ano, o que corresponde a aproximadamente 4,6% do PIB nacional,

além de ser um dos setores que mais empregam, com mais de 4,2 milhões de empregos (NEVES, 2009).

A disponibilidade de água é a principal variável climática causadora de variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar. Conforme relatado por Scardua e Rosenfeld (1987), o consumo de água pela cultura também varia com o estágio fenológico, com as condições meteorológicas e com a disponibilidade hídrica no solo. De acordo com Nable et al. (1999), em comparação à cultura do sorgo, a transpiração da cultura da cana-de-açúcar é extremamente sensível à baixa umidade do solo.

O número de colmos de cana-de-açúcar aptos à indústria é reduzido sob condições de restrição de água. Similarmente, o diâmetro e a elongação da planta são afetados pelo estresse hídrico (SILVA; COSTA, 2004; SOARES et al., 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Por essa razão, métodos para quantificar e monitorar o estresse hídrico têm recebido extensiva atenção de pesquisadores como Idso et al. (1981), Jackson et al. (1981) e Payero e Irmak (2006).

Do ponto de vista agrometeorológico, há grande interesse pelo desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao uso eficiente de água, objetivando o aumento de produção com utilização mínima dos recursos hídricos disponíveis. Nesse contexto, faz-se necessário a execução de estudos do consumo de água por diferentes variedades de cana-de-açúcar nas regiões onde essa espécie é cultivada nas condições de sequeiro. Por outro lado, em cultivos irrigados, o conhecimento da transpiração, juntamente com o desenvolvimento de sensores eletrônicos, é fundamental para o manejo da frequência e duração dos intervalos de irrigação (STEIDLE NETO et al., 2005; ZOLNIER, 2004).

Com base no exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento da temperatura foliar e da transpiração da cana-de-açúcar sob diferentes tensões matriciais do substrato de cultivo e condições meteorológicas, visando à estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura (IEHC), o qual pode ser aplicado no manejo de irrigação e em estimativas de produtividade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma poácea tropical de porte alto e metabolismo C₄, que se caracteriza por elevada taxa fotossintética, apresentando, por isso, alta produtividade biológica (IRVINE, 1980).

2.1.1. Variáveis climáticas

Segundo Doorembos e Kassam (1994), a cana-de-açúcar é cultivada em regiões que englobam vários tipos de clima, localizadas principalmente entre os paralelos de 35°N a 35°S e em altitudes que alcançam até 1000 m. No Brasil, o cultivo de cana-de-açúcar é realizado em todos os estados da federação, mas as grandes regiões canavieiras restringem-se, principalmente, às latitudes situadas entre 8° e 23°S (BARBIERI; VILLANOVA, 1977).

2.1.1.1. Radiação solar

A radiação solar intervém no crescimento e desenvolvimento da planta e no regime térmico, sendo fundamental para a produção de biomassa. Tem grande importância no condicionamento da evapotranspiração. Assim, a radiação líquida disponível ao meio, resultante do balanço energético, é a

variável mais utilizada para a estimativa da demanda hídrica (ORTOLANI; CAMARGO, 1987; MARCHIORI, 2004).

2.1.1.2. Fotoperíodo

Segundo Barbieri (1981), o fotoperíodo é um fator importante para o desenvolvimento das culturas e afeta o comprimento dos colmos da cana-de-açúcar. Quando compreendido entre valores variando entre 10 e 14 horas, há um aumento no tamanho dos colmos. No entanto, sob fotoperíodos longos, entre 16 e 18 horas, o colmo sofre redução em seu tamanho. Além disso, este fator atua também como condicionador do florescimento da cana-de-açúcar, juntamente com a temperatura. Para que ocorra florescimento, o fotoperíodo deve estar entre 12 e 12,5 horas (PEREIRA et al., 1983). Contudo, a indução do florescimento só ocorre, nesse período, se a temperatura máxima estiver abaixo de 31°C e a mínima acima de 18°C durante um número mínimo de dias. Segundo Pereira et al. (2002), isso explica por que a cana-de-açúcar floresce em alguns anos e não em outros.

2.1.1.3. Temperatura

Segundo Sinclair et al. (2004), o crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar são relacionados com a temperatura do ar em cada estágio de desenvolvimento. Esse comportamento também foi observado no trabalho de Bonnett (1998), ao relatar que em baixas temperaturas do ar, inferiores a 8°C, o desenvolvimento das folhas de algumas cultivares foi prejudicado. Sinclair et al. (2004), ao estudarem o efeito das temperaturas mínimas ideais para o desenvolvimento das folhas, encontraram limites diferentes de temperatura para cada cultivar avaliada, tendo observado que a temperatura base para desenvolvimento foliar estaria em torno de 10°C, variando conforme a cultivar.

Inman-Bamber (2004) cita que as temperaturas elevadas em períodos de estresse hídrico causam a diminuição da área foliar, pois aceleram o processo de senescência das folhas verdes. O crescimento é desprezível sob

temperatura acima de 38°C (INMAN-BAMBER, 1994; BARBIERI; VILLA NOVA, 1977; DOOREMBOS; KASSAM, 1994).

As plantas de metabolismo C₄, sob temperaturas mais elevadas (30 a 38°C), possuem alto desempenho fotossintético em comparação com plantas C₃, pois necessitam de concentrações menores de CO₂ (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Para a taxa de alongação da cultura, relatos indicam que a variação ocorre principalmente de acordo com a temperatura. No verão, quando as médias de temperaturas diurnas estão entre 20 a 30°C, podem ser observadas taxas de alongação por volta de 1 cm dia⁻¹, conforme relatam Liu e Heylar (2003), em seu estudo sobre a influência das estações do ano no crescimento de colmos. Esse efeito havia sido observado por Singels e Bezuidenhout (2002), quando verificaram que a taxa de alongação do colmo havia sido regulada por uma temperatura base de 16°C e que a temperatura ótima para a alongação dos colmos foi 28°C.

2.1.1.4. Disponibilidade hídrica

Segundo Maule et al. (2001), a disponibilidade de água no solo governa a produção vegetal, sendo que sua falta ou seu excesso afeta de maneira significativa o desenvolvimento da área foliar da cana-de-açúcar. As necessidades hídricas da cana-de-açúcar variam conforme os diferentes períodos de crescimento. Segundo Doorembos e Kassam (1994), dependendo do clima, a cana-de-açúcar necessita, em média, de 1.500 a 2.500 mm de chuva, uniformemente distribuídos. O ideal é que durante a época de maturação, a precipitação seja menor do que no período de crescimento.

Quando a quantidade de água não atende à necessidade hídrica da cultura, desenvolve-se um estresse hídrico que afeta negativamente o crescimento e, por fim, o rendimento final da cultura, já que causa o fechamento dos estômatos e a diminuição da fotossíntese em adaptação a escassez de água (PEREIRA et al., 2002). Dependendo da variedade de cana-de-açúcar, as plantas tendem a fechar os estômatos, enrolar as folhas e realizar ajustes osmóticos, como mecanismos de tolerância ao estresse hídrico (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; ROBERTS et al., 1990).

Os déficits hídricos provocam a redução da área foliar e do acúmulo de biomassa com ligeiro impacto na produção final. Dados obtidos por Inman-Bamber (2004) evidenciam que se ocorrer estresse hídrico durante o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, haverá uma restrição dos processos fisiológicos como a divisão celular e a sua elongação, o que causaria danos como a diminuição na taxa de acúmulo de massa seca, na taxa de elongação da cultura e no índice de área foliar. O déficit hídrico severo ocasiona um impacto maior na produtividade dos colmos e de sacarose. Inman-Bamber (2004) concluiu que o acúmulo de biomassa é bastante reduzido com déficit hídrico superior a 120 mm anuais e o acúmulo de sacarose no colmo é afetado com déficit hídrico superior a 145 mm anuais (ARGENTON, 2006).

Inman-Bamber (2004) observou que a taxa de elongação do colmo teve variação de acordo com a disponibilidade de água, pois quando houve disponibilidade abaixo dos 36 mm mensais, ocorreu uma redução na taxa de elongação, comparada com os tratamentos com maior disponibilidade de água.

Uma boa compreensão de como a cultura responde ao estresse hídrico é a condição prévia para escolher as melhores cultivares e práticas para explorar ao máximo os recursos naturais. Assim, o planejamento do plantio e colheita é necessário adequar os períodos de estresse hídrico de forma que o mesmo seja mínimo durante as fases críticas do crescimento da cultura (SMITH, 2005).

2.2. Temperatura foliar como indicador de estresse hídrico das culturas

Dentre as várias técnicas utilizadas para monitorar o estresse de água das plantas, a temperatura foliar é um método indireto fundamentado na hipótese de que a transpiração resfria as folhas em relação ao ar adjacente. À medida que a água torna-se limitante, a transpiração é reduzida e, em consequência, ocorre aumento da temperatura foliar pela absorção da radiação solar incidente (JACKSON, 1982). Sob estresse hídrico, uma das primeiras respostas das variedades de cana-de-açúcar pode ser o fechamento estomático, a fim de minimizar a perda de água, reduzindo também a taxa de fotossíntese líquida (LARCHER, 2000; TAIZ; ZEIGER, 2004). Nas mesmas

condições ambientais, uma planta sob condições de estresse hídrico apresenta temperatura foliar superior quando comparada à cultivada sob condições plenas de disponibilidade hídrica (TESTI et al., 2008).

A termometria infravermelha é um método que possibilita a medição da temperatura da porção superior do dossel vegetativo sem a necessidade de contato físico com as folhas. O valor obtido corresponde à média da temperatura medida dentro do campo de visada do sensor. Segundo Pinter Junior e Reginato (1982), as principais vantagens da termometria infravermelha, sobre técnicas convencionais de detecção do estresse hídrico (sintomas visuais, condutância estomática, fluxo de seiva, balanço de água no solo), são a facilidade e a rapidez com que as medidas de temperatura do dossel vegetativo podem ser obtidas. Como desvantagem pode-se citar o custo do termômetro infravermelho e a dependência da t_c em relação às variáveis meteorológicas, já estudada por Wiegand e Swanson (1973), Berliner et al. (1984) e O'Toole e Hatfield (1983).

Apesar de apontar as vantagens da termometria a infravermelho, Peñuelas et al. (1992) sugeriram que a temperatura das folhas obtidas com termopares pode ser utilizada para medir a temperatura foliar da cultura do morango. Medições de temperatura foliar com termopares também foram descritas por Yang et al. (1989) para a cultura do pepino e por Katsoulas et al. (2001) para a roseira.

Nos primeiros estudos realizados com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da temperatura foliar, como indicador do grau de estresse hídrico a que as plantas estavam submetidas, foi utilizada apenas a diferença entre a temperatura da cultura (t_c) e a do ar do ambiente de cultivo (t_{ar}). Normalmente, essas medições eram conduzidas entre 12 e 13 horas quando a radiação solar incidente alcançava o seu valor máximo. Nestes casos, assumia-se que as plantas estavam transpirando em condições plenas, ou seja, sem estresse hídrico, quando a diferença " $t_c - t_{ar}$ " era negativa. Em contraste, presumia-se que havia a necessidade de irrigação quando esta diferença fosse positiva, pois o resfriamento foliar evaporativo estava sendo suprimido (IDSO, 1982). De acordo com este autor, a diferença " $t_c - t_{ar}$ " era insuficiente para assegurar um controle adequado da irrigação, pois não somente a disponibilidade hídrica,

mas também as variáveis meteorológicas afetavam a diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ”.

Utilizando termopares tipo “T” inseridos na nervura principal das folhas, por meio da elaboração de um gráfico, tendo no eixo da ordenada a diferença de temperatura entre as folhas superiores do algodoeiro e o ar adjacente (“ $t_c - t_{ar}$ ”) e no eixo da abscissa o déficit de pressão de saturação do vapor d’água no ar (DPV_{ar}), Ehrlér (1973) observou uma relação linear e inversamente proporcional entre estas variáveis.

Conduzindo experimentos com as culturas da abóbora, alfafa e soja nos estados do Arizona, Kansas, Nebraska, Minnesota e Dakota do Norte, utilizando termometria infravermelha, Idso et al. (1981) também verificaram uma relação linear entre “ $t_c - t_{ar}$ ” e o DPV_{ar} . Neste estudo, quando as plantas foram cultivadas sem nenhuma restrição hídrica, os dados obtidos da diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” permitiram estabelecer uma linha base inferior para cada espécie vegetal avaliada. Em decorrência de diferenças de transpiração entre as plantas, foram determinados os valores dos parâmetros específicos para cada espécie. Embora a presença de nuvens tenha modificado o intercepto e a inclinação da linha base inferior de temperatura, a relação linear foi preservada.

Esta relação, entretanto, muda com o conteúdo de água no solo (EHLER, 1973; JACKSON et al., 1977; IDSO et al., 1981; GONTIA; TIWARI, 2008) e com as variáveis meteorológicas (ZOLNIER et al., 2001; PAYERO et al., 2005). Conduzindo um experimento com a cultura da poinsetia em câmara climática, Zolnier et al. (2001) demonstraram que a relação linear entre “ $t_c - t_{ar}$ ” e o DPV_{ar} foi deslocada quando as plantas foram submetidas a diferentes intensidades de radiação obtidas a partir de fonte de radiação artificial. O efeito da radiação incidente sobre a linha base inferior de temperatura também foi relatado por Testi et al. (2008) para a cultura do pistache. De acordo com os autores, a condutância aerodinâmica, devido à velocidade do ar, influencia menos a relação linear entre “ $t_c - t_{ar}$ ” e o DPV_{ar} do que a radiação solar.

Combinando a equação do balanço de energia e a equação de Penman-Monteith, Jackson et al. (1981) apresentaram as considerações teóricas para o desenvolvimento do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) baseado na temperatura foliar, o qual foi denominado pelos autores de Crop Water Stress Index (CWSI).

Para a aplicação deste índice, há a necessidade de se conhecer a relação linear entre $t_c - t_{ar}$ e DPV_{ar} para a planta em condições de ausência de estresse hídrico (limite inferior) e de estresse hídrico máximo (limite superior), representados por, $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ e $(t_c - t_{ar})_{LBS}$, respectivamente. O objetivo dos limites inferior e superior é formar uma faixa na qual a diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) possa ser normalizada.

Muitos estudos relataram as dificuldades em determinar o IEHC em regiões úmidas, onde a elevada umidade do ar e as frequentes variações na velocidade do ar e na radiação solar incidente podem gerar imprecisão no cálculo do IEHC (LEBOURGEOIS et al., 2010).

Outros autores também substituíram os limites teóricos, inferior e superior, por meio de medições de temperatura em superfícies de referência molhadas e secas, respectivamente. Assim, Cohen et al. (2005) e Moller et al. (2007) adotaram painéis artificiais molhados, feitos com espuma de poliestireno revestida com uma mistura de poliéster e viscosa, para obter o limite inferior. Por outro lado, Wang et al. (2005) utilizaram folhas cobertas por uma camada de resina, que obstrui os estômatos, eliminando a transpiração, para obter o limite superior.

Jalali-Farahani et al. (1993) observaram que o limite inferior $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ para o cálculo do IEHC em uma poácea bem irrigada não é somente função do DPV_{ar} , mas também do saldo de radiação, enquanto o limite superior $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ tem forte correlação com o saldo de radiação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Cultivo de cana-de-açúcar em casa de vegetação

Para evitar a influência da precipitação pluvial sobre os níveis de disponibilidade de água no meio de cultivo, este experimento foi conduzido em uma casa de vegetação não climatizada, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. As coordenadas geográficas do local são latitude 20°45 '45" S, longitude 42°52'04" W e altitude de 690 m.

A casa de vegetação possuía a maior dimensão orientada na direção Leste-Oeste e cobertura construída com estrutura metálica em forma de arco. O material plástico de cobertura era constituído de filme de polietileno de baixa densidade (PEBD) com espessura de 150 µm, possuindo aditivos contra a ação de raios ultravioleta. A instalação apresentava 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 com malha de 1 mm para reduzir a entrada de insetos no ambiente de cultivo (Figura 1).



Figura 1 – Vista interna da casa de vegetação, localizada na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola, pertencente à Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

A cultivar utilizada foi a RB867515, esta é atualmente cultivada em escala comercial, os toletes foram plantados no dia 06/05/2009 em vasos plásticos com capacidade para 10 litros, os quais foram preenchidos com substrato comercial (Bioplant, Nova Ponte, MG), conforme ilustrado na Figura 2. O substrato era composto de casca de Pinus, agentes agregantes, vermiculita, fibra de coco e complementos minerais (NPK e micronutrientes). No total, 192 plantas foram cultivadas durante seis meses no interior da casa de vegetação, mas apenas uma parcela foi utilizada nas medições.

No fundo de cada vaso também foi perfurado um orifício circular para permitir a drenagem do excesso de água proveniente da irrigação ou de fertirrigação percolada através do substrato. Acima do orifício perfurado no fundo de cada vaso, foi colocado um disco de tela plástica com malha de 1 mm para impedir a remoção do substrato. Acima desta tela plástica, foram depositados 500 g de carvão vegetal de modo a facilitar a drenagem lateral na parte inferior do substrato.



Figura 2 – Vista parcial do cultivo da cana-de-açúcar em substrato comercial acondicionado em vasos plásticos sob condições de casa de vegetação.

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 instalado um dreno, conectado a um vaso de 4 litros para armazenamento da solução excedente após a realização dos eventos de irrigação e fertirrigação. Cada perfil coletava a drenagem proveniente de 6 vasos de cultivo, havendo no total 32 perfis de coleta de drenagem para os 192 vasos cultivados com plantas de cana-de-açúcar (Figura 3).



Figura 3 – Armazenamento da solução nutritiva em vasos plásticos, após o seu escoamento em perfis hidropônicos posicionados abaixo dos vasos de cultivo.

Durante o período de crescimento, os perfilhos da cana-de-açúcar foram removidos periodicamente, mantendo-se apenas um colmo em cada vaso. As plantas foram irrigadas por meio de micro-tubos flexíveis que derivavam de tubulações de PVC. A duração e a frequência dos eventos de irrigação foram controladas por um temporizador. No início do experimento, foram realizadas duas irrigações diárias de 1 minuto cada. No entanto, com o decorrer do experimento, a frequência e a duração dos eventos de irrigação foram aumentadas progressivamente, chegando a serem realizadas oito irrigações de um minuto, distribuídas ao longo do período diurno nos últimos dias do experimento. As plantas foram tutoradas individualmente, para garantir o crescimento vertical e evitar o tombamento causado pelo próprio peso. Para minimizar a perda de água por evaporação para o ambiente a partir do substrato, foi colocado um filme de polietileno transparente sobre a superfície do substrato (Figura 4).



Figura 4 – Detalhe do micro-tubo do sistema de irrigação e da cobertura da superfície do substrato para minimizar a evaporação d'água.

A condutividade elétrica (CE) da solução percolada nos vasos foi monitorada por meio de um condutivímetro (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).

3.2. Determinação da curva de retenção de água do substrato

Foram enviadas amostras do substrato de cultivo da cana-de-açúcar para o Laboratório de Física do Solo, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, onde se determinou a capacidade de retenção de água e a densidade aparente do substrato utilizado no experimento. A capacidade de retenção de água do substrato foi obtida utilizando-se as câmaras de pressão de Richards.

Para avaliar o efeito da disponibilidade de água na temperatura foliar e transpiração, sob diferentes condições meteorológicas, foram estabelecidas

três classes de tensão de água (Ψ) no substrato de cultivo: ausência de estresse hídrico ($\Psi < 0,5$ bar), estresse hídrico moderado ($4,0 < \Psi < 6,0$ bars) e severo ($\Psi > 11,0$ bars).

3.3. Medição das variáveis micrometeorológicas

A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um sensor conjugado (modelo Humitter 50Y, Vaisala, Woburn, MA, USA) que foi instalado no interior de um tubo de PVC aspirado, conforme apresentado na Figura 5. O abrigo tinha por objetivo impedir a incidência direta da radiação solar sobre os elementos sensíveis do sensor e, concomitantemente, garantir uma taxa de ventilação de 5 m s^{-1} (ALLEN et al., 1998). A radiação solar global foi obtida por meio de um piranômetro (modelo LI-200SA, LI-COR, Lincoln, NE, USA) e a velocidade do ar foi medida por meio de um anemômetro de fio quente (modelo FMA-903-I, Omega, Stamford, CT, USA). O piranômetro e o anemômetro também foram fixados na torre de aspiração constituída de PVC. Inicialmente, os sensores foram dispostos a 1,5 m da superfície do solo e, posteriormente, o nível de posicionamento dos sensores foi alterado periodicamente, de acordo com o crescimento da cana-de-açúcar, sempre procurando mantê-los um pouco acima do dossel vegetativo da cultura.

Os sinais dos sensores responsáveis pela medição das variáveis meteorológicas no interior da casa de vegetação foram conectados a uma placa de aquisição de dados (modelo CYDAS 1602HR, CyberResearch, Branford, CT, USA), instalada em um microcomputador. Para o gerenciamento do processo de aquisição e armazenamento dos dados provenientes dos sensores, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C++ Builder, versão 6.0, no ambiente Windows.



Figura 5 – Vista parcial do tubo de PVC aspirado onde foi instalado internamente o sensor de temperatura e umidade relativa do ar. Na parte externa foram fixados o piranômetro e o anemômetro de fio quente.

3.4. Monitoramento da transpiração e temperatura foliar

Foram realizadas medições da temperatura foliar com um termômetro a infravermelho e da transpiração de plantas individuais de cana-de-açúcar a partir de balanças de precisão. O monitoramento destas variáveis foi realizado uma vez por semana, a partir do dia 13/06/2009, 38 dias após o plantio (DAP), até o dia 21/11/2009, 199 DAP. Totalizando 24 datas de amostragem sem restrição hídrica.

Além disso, foram realizadas três campanhas de monitoramento com restrição hídrica, a cada dois dias, nos períodos de 122 a 132, 150 a 158 e 181 a 189 DAP. As campanhas foram encerradas quando a tensão matricial no substrato foi superior a 15 bars.

A transpiração foi monitorada por meio de três balanças de precisão (Tecnal, Piracicaba, SP) (Figura 6), com capacidade individual de 12 kg e precisão de 0,1 g. Sobre cada balança foi colocado um vaso com uma planta de cana-de-açúcar.



Figura 6 – Sistemas individuais de pesagem para medição da transpiração de plantas de cana-de-açúcar.

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 7 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, as quais possibilitaram a aquisição de dados das balanças de precisão.

A temperatura foliar foi obtida a partir do posicionamento de um termômetro a infravermelho (modelo 4000.4GL, Everest Interscience, Tucson, AZ, USA) em três pontos distintos da superfície foliar de cada uma das plantas utilizadas nas medições da transpiração, a uma distância de aproximadamente 2,5 cm (Figura 7). O termômetro a infravermelho apresentava um campo de visada de 15° e estava equipado com um filtro espectral na faixa de 8 a 14 μm , apresentando exatidão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.



Figura 7 – Medição da temperatura foliar da cana-de-açúcar com um termômetro a infravermelho.

O monitoramento da temperatura foliar também foi realizado uma vez por semana, no período compreendido entre 7 e 18 horas. Neste período, em intervalos de uma hora, na direção de nove folhas escolhidas ao acaso, situadas na porção superior do dossel vegetativo, foram realizadas medições da temperatura foliar.

3.5. Graus dias acumulados

Para a estimativa dos graus-dia acumulados (GDA, $^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ d}^{-1}$) ou da exigência térmica, foram utilizados os dados de temperatura média diária do ar. Para o cálculo dos graus-dia acumulados (GDA), foi considerada a temperatura base da cultura igual a 10°C , como sugerido por vários autores (SMITH; SINGELS, 2006; SINCLAIR et al., 2004).

3.6. Monitoramento biométrico

O monitoramento biométrico foi executado semanalmente, a partir do dia 13/06/2009 (38 DAP) até o dia 21/11/2009 (199 DAP), totalizando 24 datas de amostragem, com objetivo de comparar a transpiração nas três campanhas

com restrição hídrica. Em cada amostragem, foram monitoradas 24 plantas distribuídas nas fileiras centrais da casa de vegetação (Figura 8).

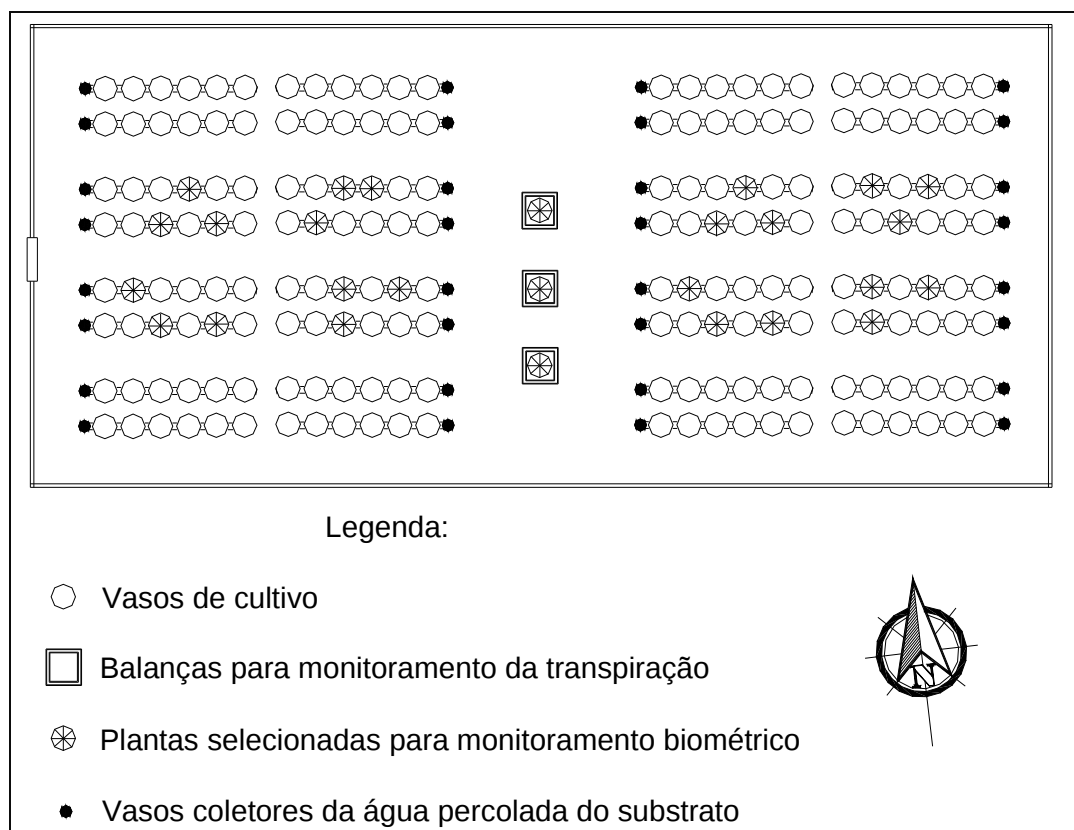


Figura 8 – Distribuição dos vasos de cultivo, balanças e plantas selecionadas para monitoramento biométrico no interior da casa de vegetação.

A estatura média dos colmos (EMC) foi mensurada com o auxílio de uma trena, medido da superfície do substrato até a primeira aurícula visível, classificada como folha +1 (primeira folha superior completamente desenvolvida com a lígula visível). Para a determinação da área foliar (AF) das plantas, foram mensurados o comprimento e a largura da porção mediana de todas as folhas de cada planta. Para o cálculo da área foliar, foi utilizada a seguinte equação, adaptada de Hermann e Câmara (1999):

$$AF = \sum_{NF} (C \times L \times 0,69) \quad (1)$$

em que NF é o número de folhas; AF, área foliar de cada planta amostrada, cm²; C, comprimento de cada folha, cm; L, largura de cada folha, cm; 0,69, fator de “forma”, este representa a forma da folha de cana-de-açúcar, uma vez que a mesma não é retangular.

Silva (2009) obteve experimentalmente o valor de 0,69 como fator de “forma”, conduzindo experimento durante o ciclo de cana soca com a cv. RB 92579 sob condições do semiárido brasileiro.

3.7. Desenvolvimento teórico do índice de estresse hídrico

O fluxo de calor latente da cana-de-açúcar para o ambiente de cultivo protegido pode ser estimado pela equação de Penman-Monteith, como descrito por Monteith (1965):

$$LE = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_{ar} c_p \frac{DPV_{ar}}{r_h}}{\Delta + \gamma (1 + r_c / r_h)} \quad (2)$$

em que LE é o fluxo de calor latente, W m⁻²; Δ, declividade da curva de pressão de saturação do vapor d’água no ar, Pa °C⁻¹; R_n, saldo de radiação, W m⁻²; G, fluxo de calor no solo, W m⁻²; ρ_{ar}, densidade do ar, kg m⁻³; c_p, calor específico do ar, J kg⁻¹ °C⁻¹; DPV_{ar}, déficit de pressão de saturação do vapor d’água no ar, Pa; r_h, resistência à transferência de calor sensível por convecção, s m⁻¹; γ, constante psicrométrica, Pa °C⁻¹; r_c, resistência de superfície à transferência de calor latente, s m⁻¹.

O fluxo de calor sensível da cana-de-açúcar para o ambiente de cultivo protegido pode ser determinado por:

$$H = \frac{\rho_{ar} c_p (t_{ar} - t_c)}{r_h} \quad (3)$$

em que H é o fluxo de calor sensível, $W\ m^{-2}$; t_{ar} , temperatura do ar, $^{\circ}C$; t_c , temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar, $^{\circ}C$.

Desconsiderando a variação do conteúdo de energia armazenada no dossel vegetativo da cana-de-açúcar, o balanço de energia pode ser estimado por:

$$0 = (R_n - G) + H - LE \quad (4)$$

De acordo com Jackson et al. (1981), quando as equações (2) e (3) são substituídas na equação (4), a diferença entre a temperatura da cultura (t_c) e a do ar do ambiente de cultivo (t_{ar}) será:

$$t_c - t_{ar} = \frac{(R_n - G)(r_h + r_c)}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} - \frac{DPV_{ar}}{\gamma (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (5)$$

Com base na equação (5), as condições teóricas de contorno referentes ao domínio da diferença " $t_c - t_{ar}$ ", para diversas variáveis meteorológicas, podem ser estabelecidas pela linha base de temperatura inferior e superior, admitindo-se que a cultura possui resistências de superfície aproximadamente nula ($r_c \cong 0$) e infinita ($r_c \cong \infty$), respectivamente.

Do ponto de vista prático, a linha base superior $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ representa a diferença de temperatura " $t_c - t_{ar}$ " de uma superfície vegetal impermeabilizada com anti-transpirantes, de maneira que a resistência de superfície assume um valor infinito e, portanto, o fluxo de calor latente (LE) torna-se nulo, ou seja, a superfície encontra-se seca. Assim, desprezando-se o termo LE e, concomitantemente, substituindo-se o fluxo de calor sensível (equação 3) na equação do balanço de energia (equação 4), encontra-se:

$$(t_c - t_{ar})_{LBS} = \frac{(R_n - G)r_h}{\rho_{ar} c_p} \quad (6)$$

No caso da linha base inferior $(t_c - t_{ar})_{LBI}$, que na prática corresponderia ao dossel vegetativo completamente molhado com resistência de superfície nula, a diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” pode ser estimada por:

$$(t_c - t_{ar})_{LBI} = \frac{(R_n - G)r_h}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma)} - \frac{DPV_{ar}}{\gamma (1 + \Delta/\gamma)} \quad (7)$$

A partir das linhas bases de temperatura inferior e superior, Jackson et al. (1981) sugeriram que a disponibilidade de água para uma dada cultura poderia ser estimada por meio da normalização do domínio da diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ”. Esta normalização foi denominada de índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) que é determinado por:

$$IEHC = \frac{(t_c - t_{ar}) - (t_c - t_{ar})_{LBI}}{(t_c - t_{ar})_{LBS} - (t_c - t_{ar})_{LBI}} \quad (9)$$

Para facilitar a determinação dos limites de temperatura $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ e $(t_c - t_{ar})_{LBS}$, Idso et al. (1981) propuseram que, sob condições plenas de umidade do solo, o limite inferior de temperatura, para uma cultura específica, pode ser encontrado a partir da relação linear entre “ $t_c - t_{ar}$ ” e o DPV_{ar} . Esta relação foi denominada de linha base de temperatura na ausência de estresse hídrico, que é estabelecida quando o solo está na capacidade de campo. Por outro lado, o limite de temperatura superior poderia ser obtido submetendo-se as plantas a condições de estresse hídrico severo.

3.8. Limites experimentais do domínio de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” para determinação do índice de estresse hídrico da cana-de-açúcar

Idso et al. (1981) propuseram um enfoque diferente para a determinação prática do índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) desenvolvido por Jackson et al. (1981), assumindo que R_n , G , r_c e r_h são praticamente constantes em condições meteorológicas específicas, geralmente observadas próximas ao meio-dia. Idso et al. (1981) argumentaram que, com uma pequena variação da velocidade do ar e da radiação solar global, a

diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” para plantas mantidas sem estresse hídrico é dependente da espécie vegetal e pode ser estimado a partir de dados do déficit de pressão de saturação do vapor d’água no ar. Dadas essas pressuposições, a equação (5) pode ser simplificada por:

$$(t_c - t_{ar}) = a - b \text{DPV}_{ar} \quad (10)$$

em que

$$a = \frac{(R_n - G)(r_h + r_c)}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (11)$$

$$b = \frac{1}{\gamma (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (12)$$

A linha base em condições de ausência de estresse hídrico fornece um limite inferior definido para uma cultura específica ao invés de um limite inferior teórico $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ como pode ser obtido pela equação (7), o qual assume uma cultura hipotética com resistência de superfície nula. Baseado no limite inferior definido pela cultura, a faixa de estresse hídrico pode ser observada na Figura 9.

Neste caso, o domínio da diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” é menos abrangente, mas, no entanto, compreende os valores realmente observados experimentalmente. O limite superior experimental representa o estresse hídrico máximo tolerado pela cultura, sendo definido quando os estômatos estariam completamente fechados.

A posição da linha de estresse hídrico máximo pode ser determinada experimentalmente mantendo-se a umidade do solo ou substrato de cultivo próxima do ponto de murcha permanente. Baseado nos limites experimentais da Figura 9, Idso et al. (1981) sugeriram que o índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) estaria compreendido entre 0 (estresse nulo), quando a diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” estivesse sobreposta à linha base experimental inferior e 1 (estresse máximo) quando a diferença estivesse próximo da linha base experimental superior.

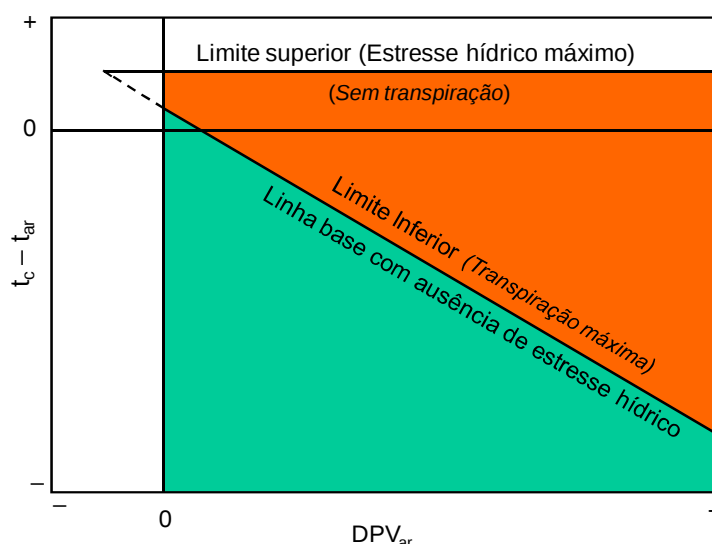


Figura 9 – Domínio experimental da diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ” em função do déficit de pressão de saturação do vapor d’água no ar (DPV_{ar}).¹

Muitos pesquisadores utilizaram a metodologia da linha base sob ausência de estresse hídrico, proposta por Idso (1982) de “non-water-stressed baseline”, para o manejo da irrigação, monitoramento do estresse hídrico e estimativa de queda da produtividade das culturas (ZOLNIER, 1999). Idso (1982) publicou os parâmetros “a” e “b” da equação (10) para 26 espécies vegetais cultivadas sob condições hídricas plenas. Em estudos mais recentes, Orta et al. (2004) obtiveram os parâmetros experimentais da linha base inferior para avaliar o estresse hídrico de três genótipos de trigo de inverno. Mahan et al. (2005) determinaram a temperatura foliar e o período de irrigação para a cultura do amendoim.

Na literatura, são escassas as informações desse índice para a cultura da cana-de-açúcar, destacando-se os trabalhos de Khera e Sandhu (1986), Boroomand-Nasab et al. (2005) e Lebourgeois et al. (2010).

No presente estudo, o experimento foi realizado sob condições controladas de disponibilidade de água para o crescimento da cana-de-açúcar, a partir da alteração da frequência de irrigação ou de fertirrigação, visando a

¹ Os limites são estabelecidos a partir de medições realizadas em plantas mantidas sob condições hídricas plenas (linha base experimental inferior) e sob restrições hídricas severas próximas ao ponto de murcha permanente (linha base experimental superior).

determinação dos limites do índice de estresse hídrico, conforme ilustrado na Figura 9.

3.9. Estimativa da diferença ($t_c - t_{ar}$) a partir de dados de R_g e DPV_{ar}

A técnica da linha base com ausência de estresse hídrico, desenvolvida por Idso et al. (1981), requer a avaliação experimental dos parâmetros “a” e “b” da equação (10). Essas constantes representam o efeito da radiação solar sobre ($t_c - t_{ar}$) em horários próximos ao meio-dia, bem como uma série de parâmetros dados pela equação (5). Deste modo, introduzindo a radiação solar incidente (R_g), a equação (5) pode ser reescrita como:

$$(t_c - t_{ar}) = a R_g - b DPV_{ar} \quad (13)$$

Esta equação assume que as trocas de radiação de onda longa em casa de vegetação são insignificantes. Adicionalmente, assumindo que o fluxo de calor latente no substrato (G) pode ser negligenciado, a constante “a” é dada por:

$$a = \frac{(1 - \alpha)(r_h + r_c)}{\rho_{ar} c_p (1 + \Delta/\gamma + r_c/r_h)} \quad (14)$$

em que α é o albedo; e a constante “b” (equação 12) permanece inalterada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variáveis meteorológicas mensuradas durante o período de cultivo da cana-de-açúcar no interior da casa de vegetação

Na Figura 10a, observa-se a variação da irradiância solar global diária (R_g) e dos valores médios diários do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), velocidade do ar (U), enquanto na Figura 10b apresenta-se a temperatura média do ar (t_{ar}) e umidade relativa média do ar (UR), ambas as figuras expressas em dias após o plantio (DAP). O período experimental, durante o qual a cana-de-açúcar foi cultivada no interior da casa de vegetação, compreendeu 199 DAP, o que corresponde a 6 meses, aproximadamente.

Os valores de R_g oscilaram de 2,5 a 19,2 MJ d⁻¹ m⁻², devido às condições parcialmente nubladas, que são características das condições climáticas de Viçosa-MG, onde foi realizado o estudo. Os valores médios diários de t_{ar} , UR e DPV_{ar} , estiveram compreendidos entre 14,2 a 26,9°C, 61 a 86% e 2,8 a 13,8 hPa, respectivamente.

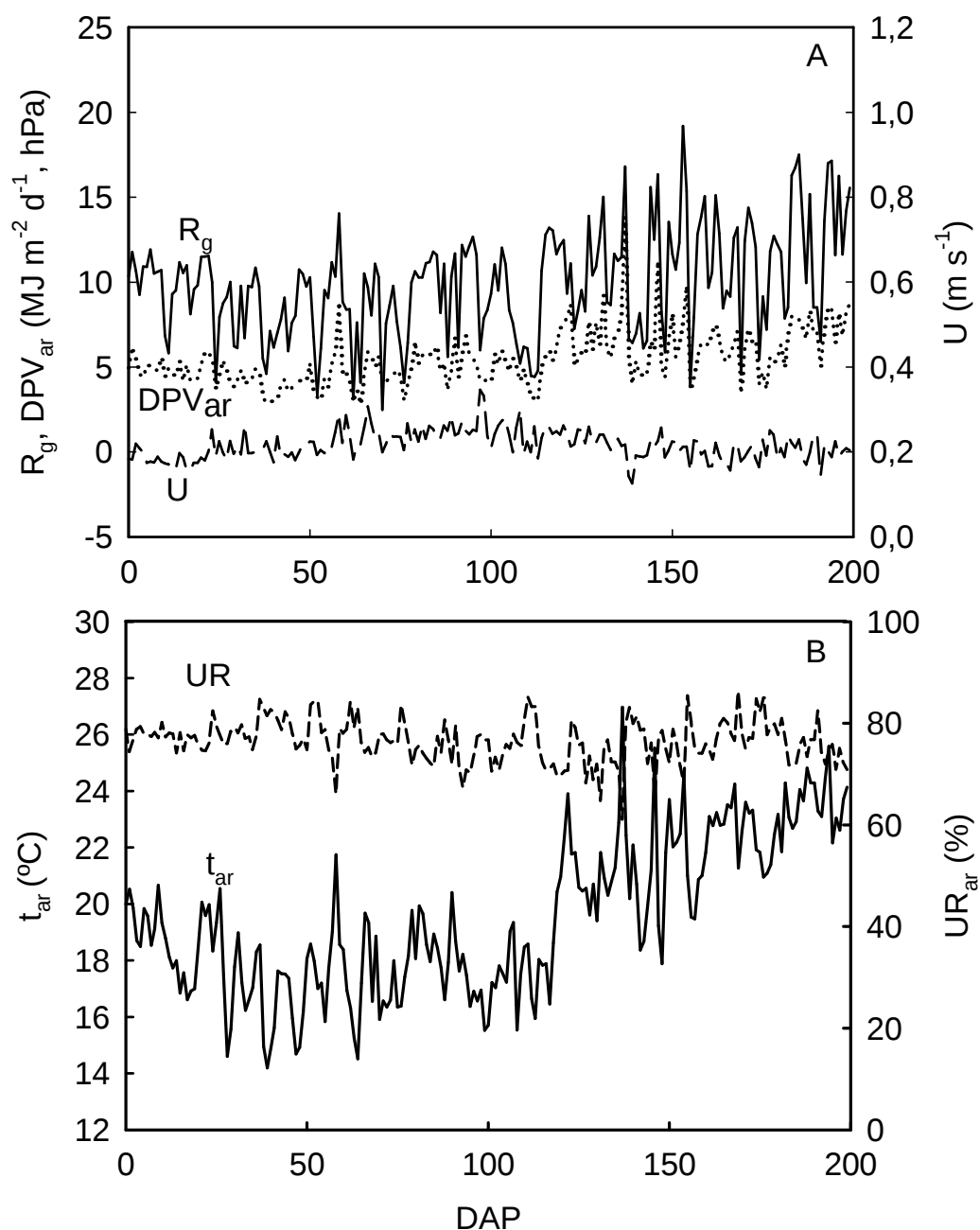


Figura 10 – Variação dos valores de irradiância solar global diária (R_g), déficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) e da velocidade do ar (U) (a) e dos valores médios da temperatura do ar (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR) (b) ao longo do ciclo de crescimento da cultura de cana-de-açúcar, expresso em dias após o plantio (DAP).

Em decorrência da utilização de telas plásticas nas laterais da instalação, para evitar a presença de insetos no ambiente de cultivo, a velocidade do ar esteve sempre abaixo de $0,35 \text{ m s}^{-1}$. Resultados semelhantes relacionados a baixos valores de velocidade do ar em ambientes protegidos também foram reportados por Wang et al. (1999), Boulard et al. (2004), Molina-Aiz et al. (2004) e Bartzanas et al. (2005).

4.2. Curva característica de retenção de água no substrato

Na Figura 11, são apresentados os valores de umidade do substrato Bioplant, que foi utilizado no cultivo de cana-de-açúcar, em função da tensão matricial (Ψ). Para a determinação da curva de retenção de água do substrato foi adotado o ajuste proposto por Van Genuchten (1980).

Observou-se que à medida que a umidade do substrato diminuía, a tensão matricial aumentava de acordo com um comportamento exponencial decrescente, tendendo a estabilizar em valores superiores a 5 bars. A densidade aparente média do substrato, determinada a partir de três amostras, foi igual a $0,23 \text{ g cm}^{-3}$.

O substrato apresenta uma grande capacidade de retenção de água, que deve ser atribuído à presença de fibra de coco em sua composição. Rodrigues (2007), em estudo comparativo entre seis diferentes substratos, evidenciou essa grande capacidade de retenção de água dos substratos que apresentavam fibra de coco em sua composição.

4.3. Análise de crescimento da cultura da cana-de-açúcar

A estatura média dos colmos (EMC), área foliar (AF) e suas respectivas equações ajustadas, em função dos graus-dia acumulados (GDA) após o plantio, podem ser observadas na Figura 12.

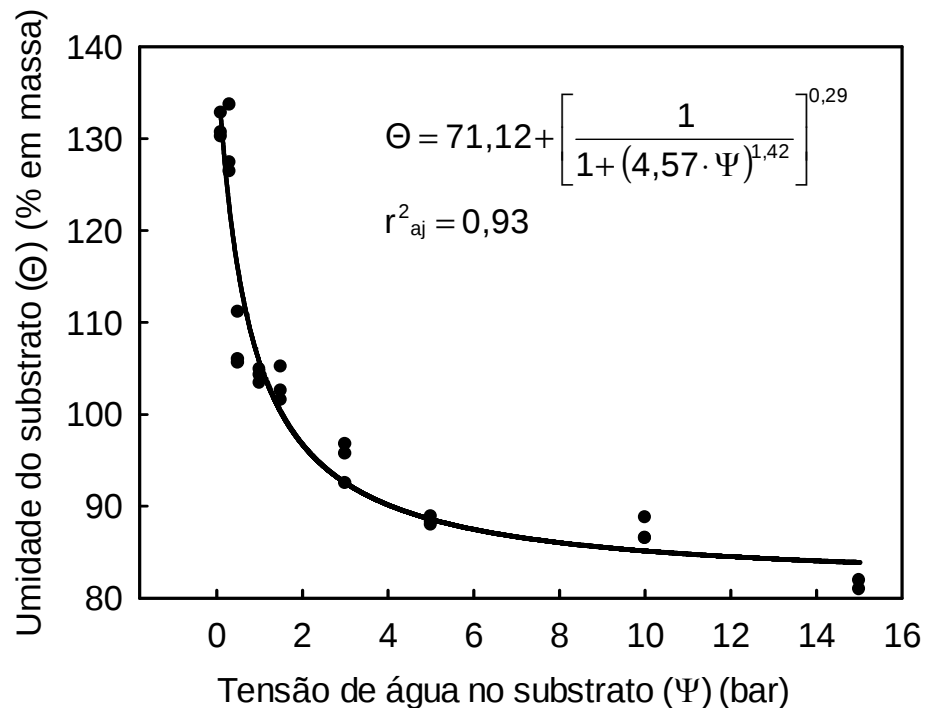


Figura 11 – Curva característica de retenção de água do substrato ajustada pelo método de Van Genuchten (1980) e equação de determinação da umidade do substrato (Θ).

No início do ciclo, constatou-se que até $840^{\circ}\text{C d}^{-1}$ (122 DAP), a EMC atingiu 46 cm, o que corresponde a aproximadamente 23% da estatura final (203 cm). Após este período, com o aumento da temperatura do ar e da disponibilidade de radiação solar, a estatura aumentou consideravelmente.

É possível verificar um incremento na AF com o decorrer do tempo, principalmente até $1530^{\circ}\text{C d}^{-1}$, atingindo valores máximos entre 1.500 e $1.800^{\circ}\text{C d}^{-1}$. Conforme Smith e Singels (2006), a área máxima de uma folha individual depende da disponibilidade de radiação, temperatura, água e nutrientes.

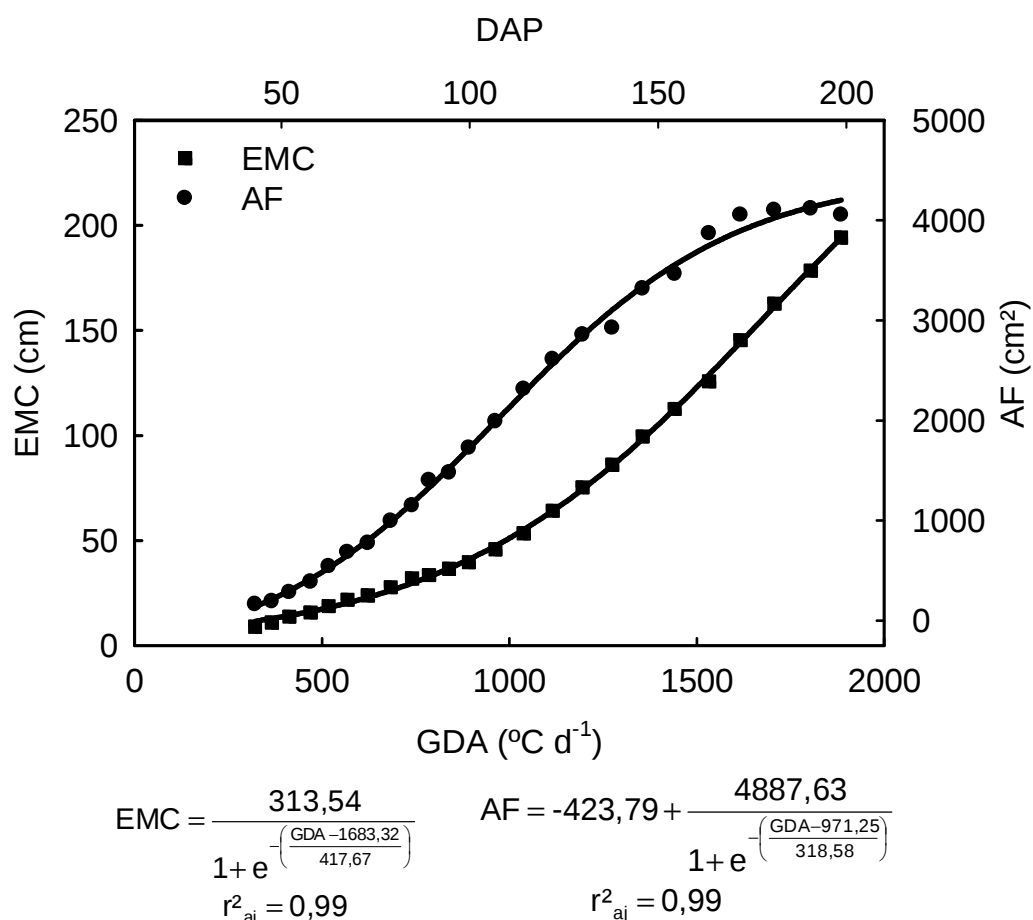


Figura 12 – Estatura média dos colmos (EMC) e área foliar (AF) da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), em função de graus-dia acumulados após o plantio (GDA).

4.4. Experimentos com diferentes níveis de tensão de água no substrato

A partir da curva característica de retenção de água no substrato, apresentada no subitem 4.2, foi estimada a tensão matricial após a suspensão da irrigação. Os diferentes níveis de tensão de água no substrato (Ψ), obtidos nas três campanhas de medição, foram classificados como: ausência de estresse hídrico ($\Psi < 0,5$ bar), estresse hídrico moderado ($4,0 < \Psi < 6,0$ bars) e estresse hídrico severo ($\Psi > 11,0$ bars).

4.4.1. Ausência de estresse hídrico

4.4.1.1. Comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar, sob ausência de estresse hídrico, em função de alterações das condições meteorológicas no ambiente de cultivo

A Figura 13 apresenta o comportamento horário, no período diurno, da temperatura foliar da cultura de cana-de-açúcar, sob ausência de estresse hídrico em três datas, 122, 150 e 185 DAP, com suas respectivas áreas foliares (AF), e demais elementos meteorológicos: temperatura do ar, radiação solar e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar.

Os valores de radiação solar incidente estão diretamente associados à interceptação ou não da radiação solar pelo piranômetro, que está condicionada à presença de sombreamento no instante das medições. Este sombreamento é afetado, principalmente, pela presença de nuvens. Em decorrência de condições parcialmente nubladas, a densidade de fluxo de radiação solar global (R_g) variou muito ao longo do dia, refletindo no comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar. Contudo, em geral, a temperatura foliar foi inferior à temperatura do ar, devido à ausência de deficiência hídrica que fez com que a planta transpirasse potencialmente. Desta maneira, ocorre resfriamento evaporativo por meio da transferência de vapor d'água das folhas para o ambiente de cultivo.

A temperatura foliar ao longo do dia, geralmente, foi inferior a temperatura do ar. Khera e Sandhu (1986) observaram uma tendência similar entre os valores de temperatura do ar e foliar da cana-de-açúcar em clima árido, mas a t_c sempre foi inferior a t_a .

Khera e Sandhu (1986) relataram valores $t_c - t_{ar}$ de até 12,4°C nos períodos mais quentes do dia, os quais raramente são observados. Contudo, Jackson (1982) indicou a possibilidade de diferenças de 10 a 15°C no valor de $t_c - t_{ar}$ em plantas cultivadas em ausência de estresse hídrico em um clima árido.

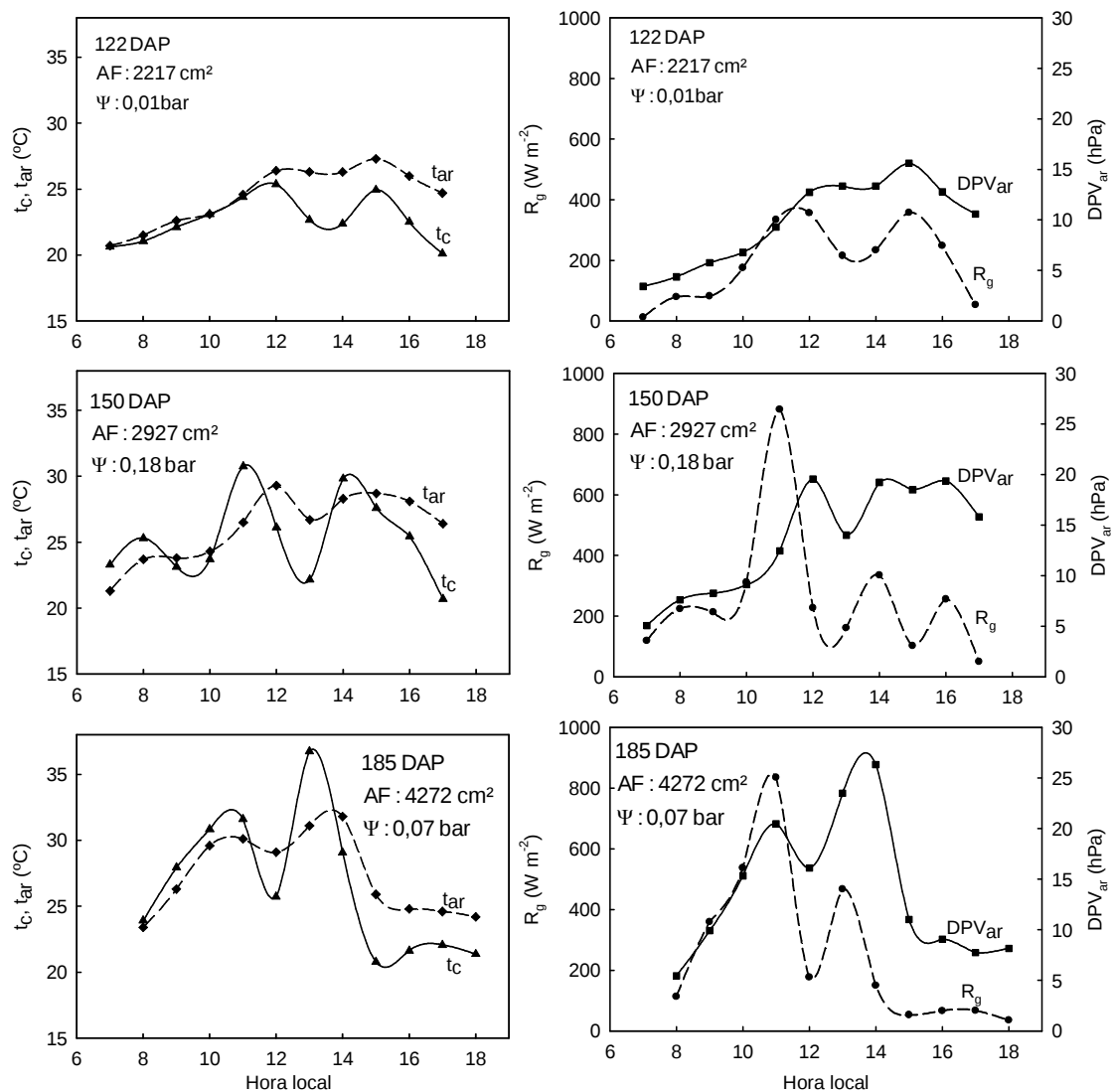


Figura 13 – Variação diurna da temperatura foliar (t_c) para cultura de cana-de-açúcar (cultivar RB867515) e temperatura do ar (t_{ar}), radiação solar incidente (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para 122, 150 e 185 dias após o plantio (DAP), em ausência de estresse hídrico.

A temperatura foliar e a R_g seguem uma tendência semelhante, embora ocorra uma defasagem em relação ao tempo em alguns momentos. O DPV_{ar} apresenta um comportamento semelhante nos três dias avaliados, com os menores valores observados no início do período da manhã, um aumento rápido com a elevação de R_g e uma diminuição no fim da tarde.

4.4.1.2. Comportamento da transpiração e da diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) durante o período diurno sob ausência de estresse hídrico

O comportamento, ao longo do período diurno, da diferença entre a temperatura foliar da cana-de-açúcar e a temperatura do ar ($t_c - t_{ar}$), bem como da transpiração, sob ausência de estresse hídrico, é apresentado na Figura 14. As medições foram conduzidas nos dias 122, 150 e 185 DAP, quando os valores de área foliar e de tensão matricial correspondiam, respectivamente, a 2.218 e 0,01, 2.927 e 0,18 e 4.272 cm^2 e 0,07 bar.

Quando totalizada ao longo do período diurno, a transpiração foi de 349, 444 e 423 $g\ planta^{-1}\ dia^{-1}$, para 122, 150 e 185 DAP, respectivamente. Observou-se uma influência marcante da radiação solar incidente sobre a transpiração, a qual variou de acordo com nebulosidade nos três dias de medição. Contudo, geralmente, os valores de transpiração aumentaram até atingir um “pico” entre 10 e 13 horas, próximo de 60, 70 e 100 $g\ planta^{-1}\ h^{-1}$, para 122, 150 e 185 DAP, respectivamente. Nos horários subsequentes, os valores apresentaram queda, prosseguindo assim até o término do período diurno. Alves (1999), conduzindo experimento com a cultivar de cana-de-açúcar NA72 454, obteve valores de transpiração entre 275 e 574 $g\ planta^{-1}\ dia^{-1}$.

A diferença de temperatura cultura-ar ($t_c - t_{ar}$) está intimamente associada ao processo de transpiração, à medida que esta aumenta há uma redução na temperatura foliar devido à dissipação de energia na forma de calor latente. Assim, a temperatura foliar torna-se inferior à temperatura do ar.

4.4.1.3. Linha-base em ausência de estresse hídrico

Os efeitos combinados da R_g e do DPV_{ar} sobre a diferença de temperatura do ar e da cultura de cana-de-açúcar ($t_c - t_{ar}$) foram expressos pela equação (15). Esta equação, que apresentou um coeficiente de determinação ajustado de 0,61, representa a posição da linha base, conforme ilustrado na Figura 9, sob ausência de estresse hídrico e é dada por:

$$(t_c - t_{ar}) = (0,0102 \pm 0,0009) R_g - (3,3165 \pm 0,1822) DPV_{ar} \quad (15)$$

Sendo que as unidades da diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$, da radiação solar global incidente (R_g) e do déficit de pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) são °C, $W\ m^{-2}$ e kPa, respectivamente.

Na Figura 15 encontram-se as regressões lineares entre $t_c - t_{ar}$, obtidas de plantas em ausência de estresse hídrico, e o déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar, para diferentes faixas de radiação solar incidente.

A radiação solar incidente (R_g) e o déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) têm efeitos opostos sobre a diferença de temperatura entre o ar e a cultura, como é indicado pelos sinais dos coeficientes de regressão. A variação da diferença de temperatura cultura-ar ($t_c - t_{ar}$), nas diferentes condições de radiação, é apresentada na Figura 16.

As inclinações das linhas-base são bastante semelhantes, indicando que, em média, a temperatura foliar sofre reduções de 3,3°C com o aumento correspondente de 1 kPa no valor de DPV_{ar} . Em contrapartida, a temperatura foliar é elevada em aproximadamente 1,0°C para cada incremento de $100\ Wm^{-2}$ na radiação solar global incidente.

Segundo Zolnier et al. (2001), o deslocamento das linhas-base de temperatura, sob ausência de estresse hídrico, pode ser explicado pelo efeito da radiação solar incidente sobre o dossel vegetativo. Embora níveis mais elevados de DPV_{ar} resultem em um grande resfriamento evaporativo, pois os estômatos estão abertos em decorrência da disponibilidade de água para o processo de transpiração, altos valores de radiação solar, inevitavelmente, promovem aumento na temperatura foliar.

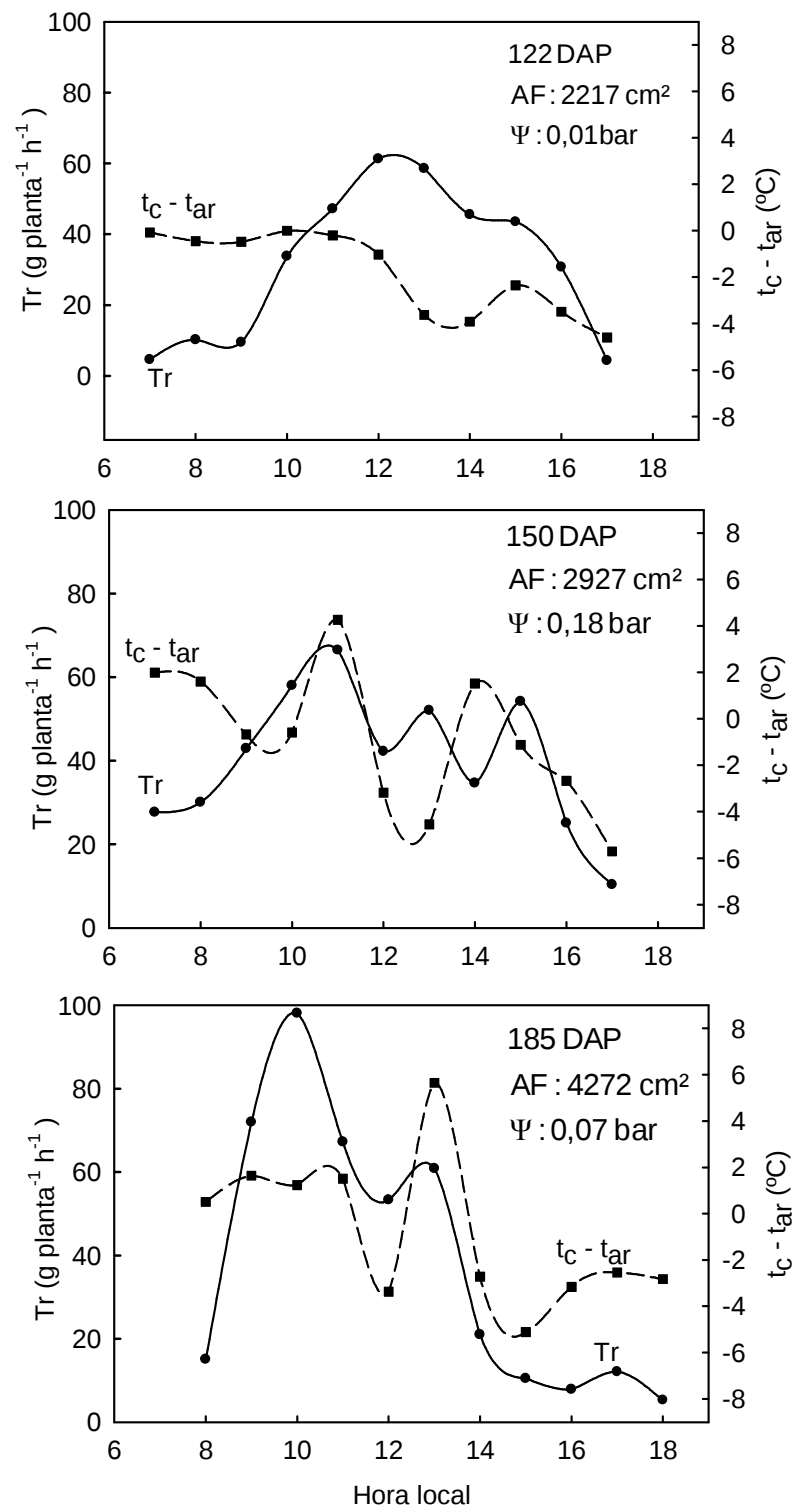


Figura 14 – Valores horários de transpiração (Tr) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) correspondente para cana-de-açúcar (cultivar RB867515) em 122, 150 e 185 dias após o plantio, com níveis de tensão matricial de 0,01, 0,18 e 0,07 bar, respectivamente, sob ausência de estresse hídrico.

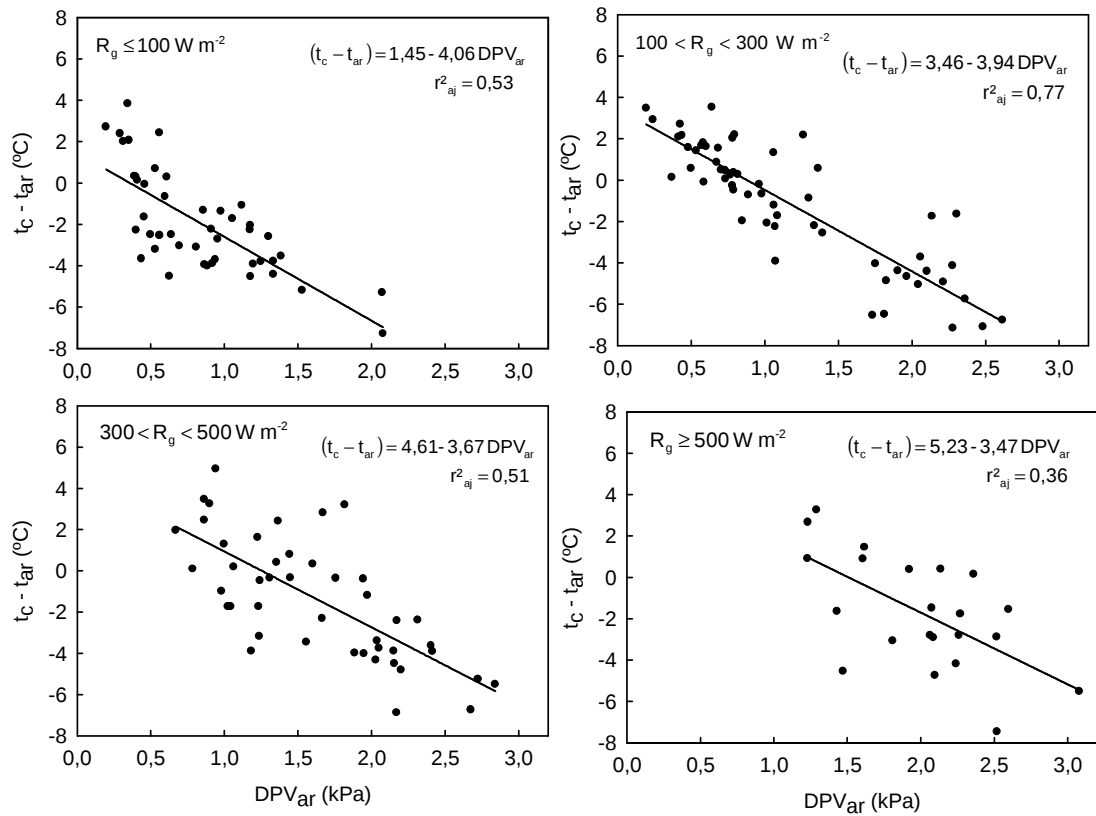


Figura 15 – Relações entre a diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$ e o déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar}), para a cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob ausência de estresse hídrico e diferentes faixas de radiação solar global incidente (R_g).

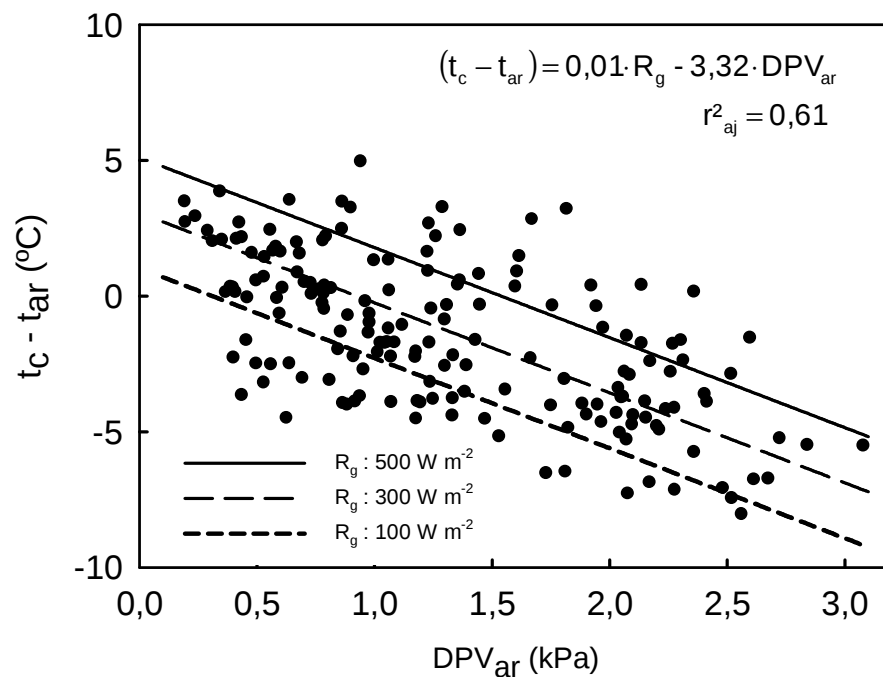


Figura 16 – Diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$ em função do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar}) e da radiação solar global incidente (R_g), para a cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob ausência de estresse hídrico.

Vale a pena salientar que, a equação (15) foi obtida sob condições de ambiente protegido onde a velocidade média do ar não ultrapassou $0,35 \text{ m s}^{-1}$. Geralmente, a velocidade do ar não é especificada em trabalhos realizados em condições de campo. No ambiente externo, a linha-base, sob ausência de estresse hídrico, é determinada nos horários próximos ao meio-dia, quando em dias sem nebulosidade, a radiação solar atinge os valores máximos, e, deste modo, a diferença $t_c - t_{ar}$ passa a ser função exclusiva do DPV_{ar} .

Idso (1982) apresentou resultados de regressões lineares entre $t_c - t_{ar}$ e DPV_{ar} para 26 diferentes espécies, sendo que os resultados demonstraram que a diferença $t_c - t_{ar}$ é afetada linearmente por DPV_{ar} . As medições foram conduzidas em condições de céu limpo, mas a velocidade do ar não foi especificada. A inclinação das linhas de regressão variou de -1,23 a -3,25 para a cevada no estágio de pós-espigamento e para o trigo no estágio de formação

de espiga, respectivamente. Assumindo-se que os fatores ambientais são idênticos durante as medições, como radiação solar incidente e velocidade do ar, estes valores sugerem grandes diferenças entre os parâmetros da linha-base, sob ausência de estresse hídrico, para diferentes culturas.

Lebourgeois et al. (2010) conduziram um experimento com a cana-de-açúcar na Ilha da Reunião, uma região úmida, e obtiveram o valor de -1,77 para a inclinação da linha de regressão, com coeficiente de determinação (r^2) de 0,67, utilizando valores de temperatura medidos entre as 13 horas e 30 minutos e 14 horas. Por outro lado, Khera e Sandhu (1986), em experimento realizado com a cana-de-açúcar em região árida, obtiveram uma inclinação da linha de regressão de -0,24, com um coeficiente de determinação (r^2) de 0,83.

Similarmente, Emekli et al. (2007) avaliaram o efeito do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar sobre a diferença $t_c - t_{ar}$ da grama-bermuda (*Cynodon dactylon* L. Pers.) entre 11 e 14 horas, durante dias de céu limpo. A inclinação da linha de regressão entre DPV_{ar} e $t_c - t_{ar}$ foi -1,06. Resultados da análise de regressão para o conjunto de 48 medições apresentaram um coeficiente de determinação (r^2) de 0,97.

4.4.2. Estresse hídrico moderado

4.4.2.1. Comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar, sob estresse hídrico moderado, em função de alterações das condições meteorológicas no ambiente de cultivo

A Figura 17 apresenta a variação horária, no período diurno, da temperatura foliar da cultura da cana-de-açúcar, sob estresse hídrico moderado em três datas, 126, 154 e 187 DAP, suas respectivas áreas foliares (AF), e demais elementos micrometeorológicos: temperatura do ar, radiação solar e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar.

Ao longo destes três dias, devido à nebulosidade, a intensidade da radiação solar global (R_g) variou muito, refletindo no comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar.

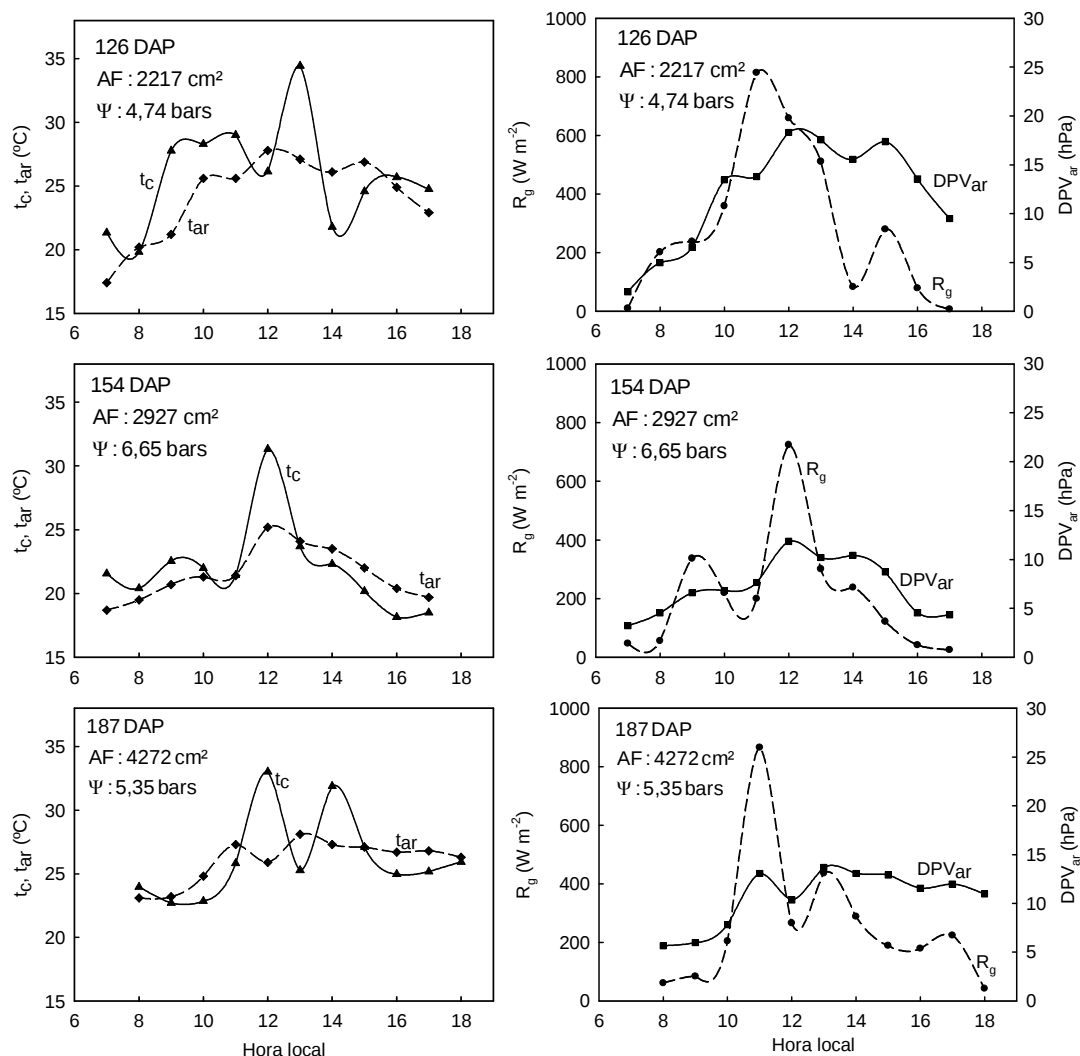


Figura 17 – Valores horários da temperatura foliar (t_c) da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), temperatura do ar (t_{ar}), radiação solar global incidente (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para 126, 154 e 187 dias após o plantio (DAP), sob condições de estresse hídrico moderado.

Para níveis de tensão matricial no substrato entre 4,0 e 6,0 bars, a disponibilidade de água é limitante, reduzindo o processo de transpiração e, desta maneira, a temperatura foliar foi, em geral, superior à temperatura do ar.

Da mesma forma que no experimento com ausência de estresse hídrico, a temperatura foliar e a R_g seguiram uma tendência semelhante, embora existisse uma defasagem em relação ao tempo em alguns momentos.

Isto ocorreu devido à influência do DPV_{ar} sobre a transpiração. O DPV_{ar} , ao longo do dia, apresentou um comportamento semelhante em 126 e 154 DAP, com uma leve tendência de elevação pela manhã até entre 11 e 13 horas, e diminuição no fim da tarde. Já em 187 DAP, o DPV_{ar} permaneceu elevado até o fim do dia.

4.4.2.2. Comportamento da transpiração e da diferença de temperatura (t_c-t_{ar}) durante o período diurno sob estresse hídrico moderado

Na Figura 18 é apresentado o comportamento, ao longo do período diurno, da diferença entre temperatura foliar e do ar (t_c-t_{ar}), bem como a transpiração da cultura de cana-de-açúcar, para três datas e diferentes áreas foliares (AF), sob estresse hídrico moderado.

A transpiração diária, nestes dias avaliados, foi de 251, 108 e 163 g planta⁻¹ dia⁻¹, para 126, 154 e 187 DAP, respectivamente, que são valores inferiores aos medidos no tratamento sem restrição hídrica. A R_g variou bastante devido à nebulosidade, o que consequentemente influenciou a taxa transpiratória. Contudo, os valores de transpiração aumentaram até atingir um valor máximo entre 10 e 12 horas, próximo de 40, 20 e 35 g planta⁻¹ h⁻¹, para 126, 154 e 187 DAP, respectivamente. Já nos horários subsequentes, os valores apresentam queda prosseguindo assim até o fim do dia.

A redução da temperatura foliar em relação à temperatura do ar está relacionada com o processo da transpiração. Com a redução da disponibilidade hídrica no substrato, a transpiração é reduzida e, consequentemente, a redução na temperatura foliar é menor em comparação com uma planta em plenas condições de disponibilidade hídrica.

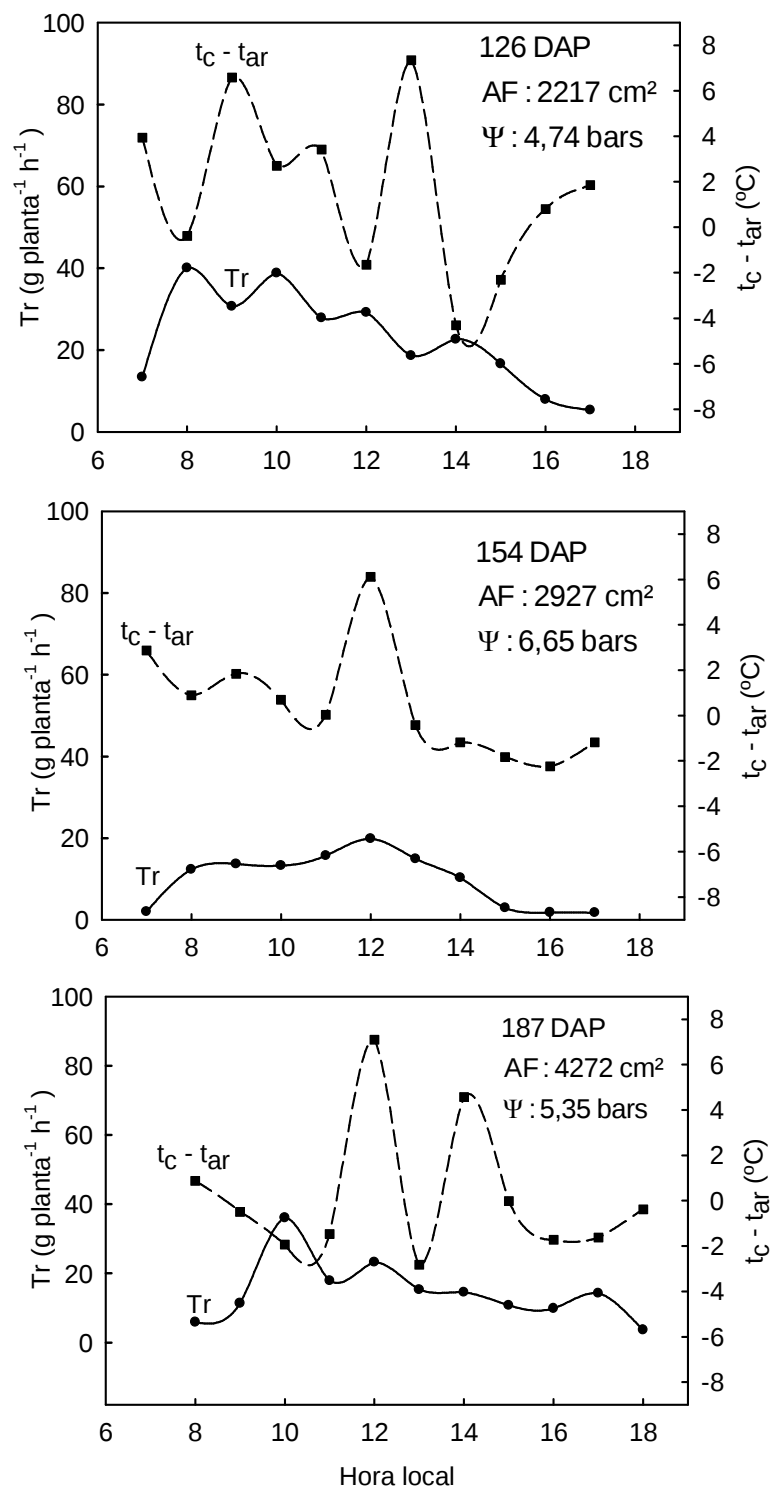


Figura 18 – Valores horários de transpiração (Tr) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) correspondente para cana-de-açúcar (cultivar RB867515), em 126, 154, e 187 dias após o plantio, com tensões matriciais de 4,74, 6,65 e 5,35 bars, respectivamente, sob estresse hídrico moderado.

4.4.2.3. Linha-base sob condições de estresse hídrico moderado

Na Figura 19 são apresentadas as regressões lineares entre $t_c - t_{ar}$ e o déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar, para duas faixas de radiação solar incidente, obtidas de plantas em estresse hídrico moderado. Para isto, foram consideradas as medições obtidas quando a tensão de água no substrato estava entre 4 e 6 bars.

A inclinação das linhas de regressão são menos negativas comparadas com as das linhas das Figuras 15 e 16, sem estresse hídrico. Além disso, o coeficiente de determinação é muito baixo, 0,24 e 0,03, para a faixa inferior a 300 Wm^{-2} e igual ou superior a 300 Wm^{-2} , respectivamente. Al-Faraj et al. (2001), conduzindo experimento com a cultura da festuca (*Festuca arundinacea* Schreb.) em diferentes níveis de irrigação, também obtiveram coeficientes de determinação (r^2) baixos (0,21 e 0,06) para plantas mantidas em estresse hídrico moderado e níveis de radiação solar incidente de 377 e 585 Wm^{-2} , respectivamente. Devido a isso, também foram calculadas as médias da diferença $t_c - t_{ar}$, para cada nível de radiação solar incidente, sendo $-1,30^\circ\text{C}$ e $1,95^\circ\text{C}$, para a faixa inferior a 300 W m^{-2} e igual ou superior a 300 Wm^{-2} , respectivamente.

4.4.3. Estresse hídrico severo

4.4.3.1. Comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar, sob estresse hídrico severo, em função de alterações das condições meteorológicas no ambiente de cultivo

A Figura 20 apresenta o comportamento horário, no período diurno, da temperatura foliar da cultura de cana-de-açúcar em três datas, 128, 156 e 191 DAP, com suas respectivas áreas foliares (AF), e demais elementos micrometeorológicos: temperatura do ar, radiação solar e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar, com estresse hídrico severo.

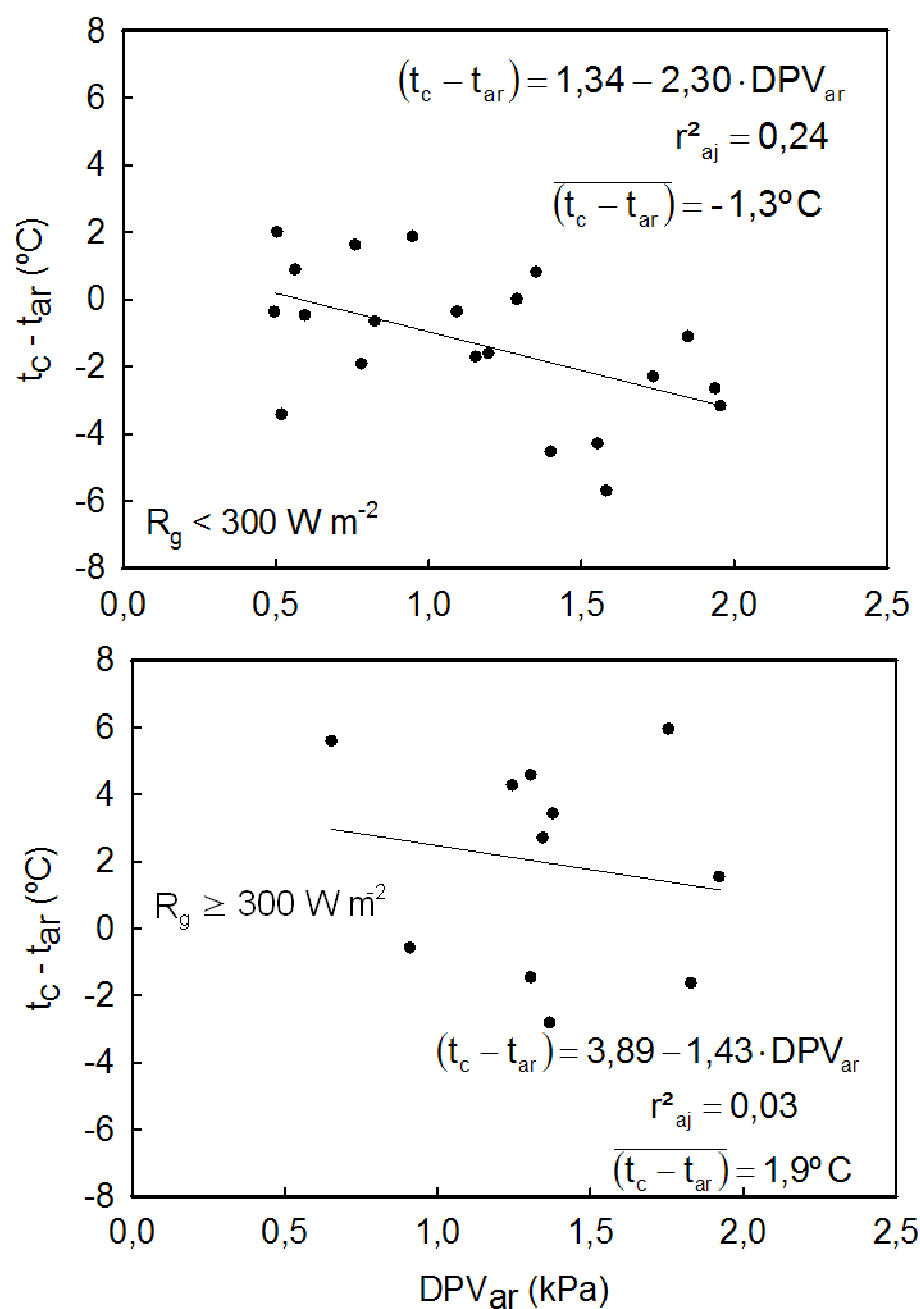


Figura 19 – Relações entre a diferença de temperatura cultura-ar ($t_c - t_{ar}$) e o déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para a cultura da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob estresse hídrico moderado (tensão: 4 a 6 bars) e duas faixas de radiação solar incidente (R_g).

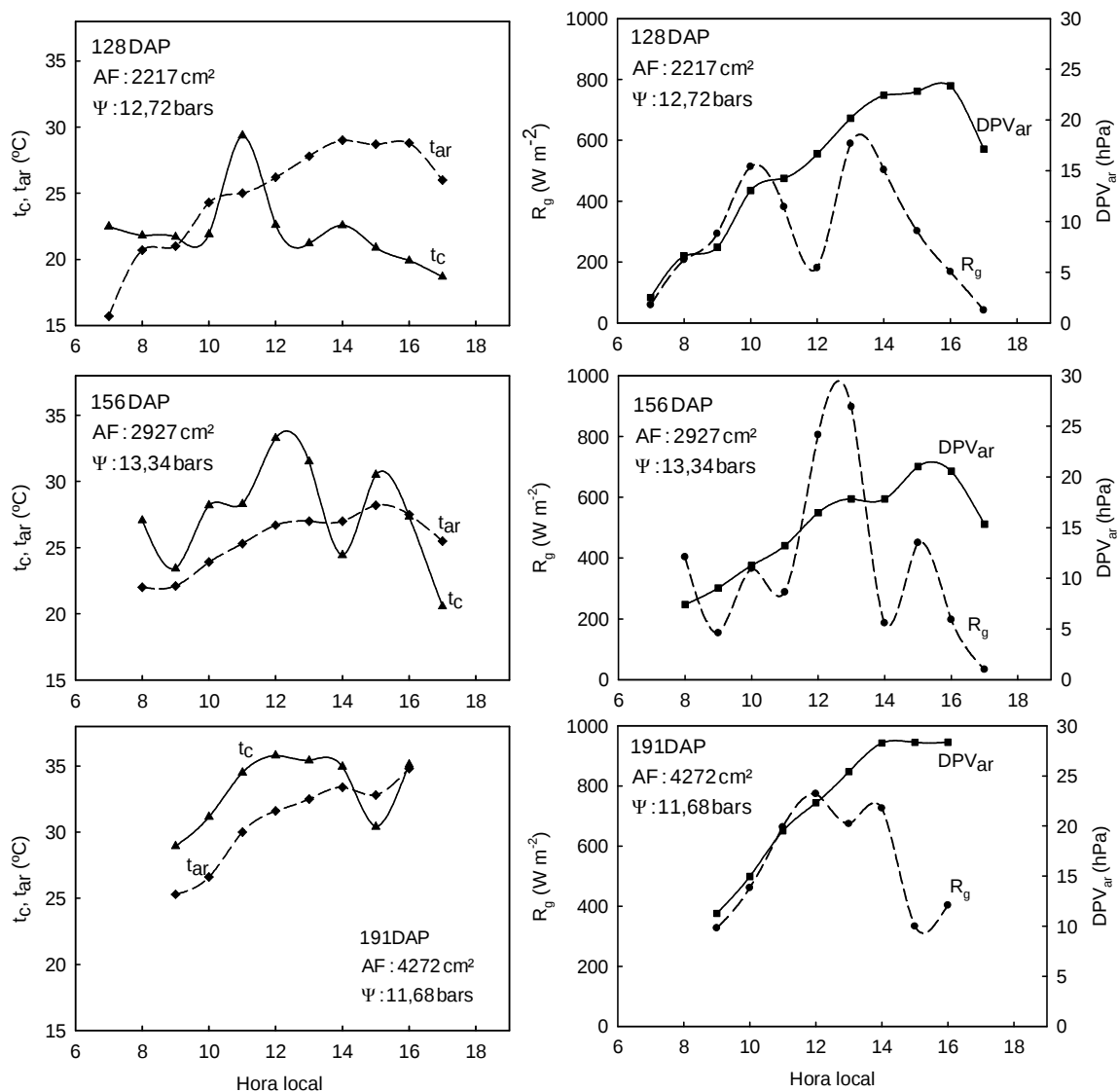


Figura 20 – Valores horários de temperatura foliar (t_c) da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), temperatura do ar (t_{ar}), radiação solar global incidente (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para 128, 156 e 191 dias após o plantio (DAP), sob condições de estresse hídrico severo.

No decorrer destes três dias, a intensidade da radiação solar global (R_g) variou muito, devido à nebulosidade do local, refletindo no comportamento da temperatura foliar da cana-de-açúcar. Nestes níveis de tensão matricial no substrato, superior a 11,0 bars, a disponibilidade de água é limitante. Com isso, o processo de transpiração foi reduzido drasticamente e, desta forma, a temperatura foliar, em geral, foi superior à temperatura do ar, chegando a superar 6,0°C. Para 128 DAP, a temperatura foliar no período da tarde foi inferior à temperatura do ar, em decorrência dos baixos níveis de radiação solar incidente.

A temperatura foliar e a R_g seguiram uma tendência semelhante, embora existisse uma defasagem em relação ao tempo em alguns momentos. Isto ocorre devido à influência do DPV_{ar} , que ao longo do dia, apresentou um comportamento semelhante em 128 e 156 DAP, com uma leve tendência de elevação pela manhã, até entre 11 e 15 horas, e diminuição no fim da tarde. Em 191 DAP, o DPV_{ar} teve tendência de elevação pela manhã até as 13 horas, estabilizando-se até a última medição do dia.

4.4.3.2. Comportamento da transpiração e da diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) durante o período diurno sob estresse hídrico severo

O comportamento, ao longo do período diurno, da diferença entre a temperatura foliar da cana-de-açúcar e a temperatura do ar ($t_c - t_{ar}$), bem como da transpiração, sob estresse hídrico severo, é apresentado na Figura 21. As medições foram conduzidas nos dias 128, 156 e 191 DAP, quando os valores respectivos de área foliar e de tensão matricial correspondiam, respectivamente, a 2218 e 12,72, 2927 e 13,34, e 4272 cm² e 11,68 bars.

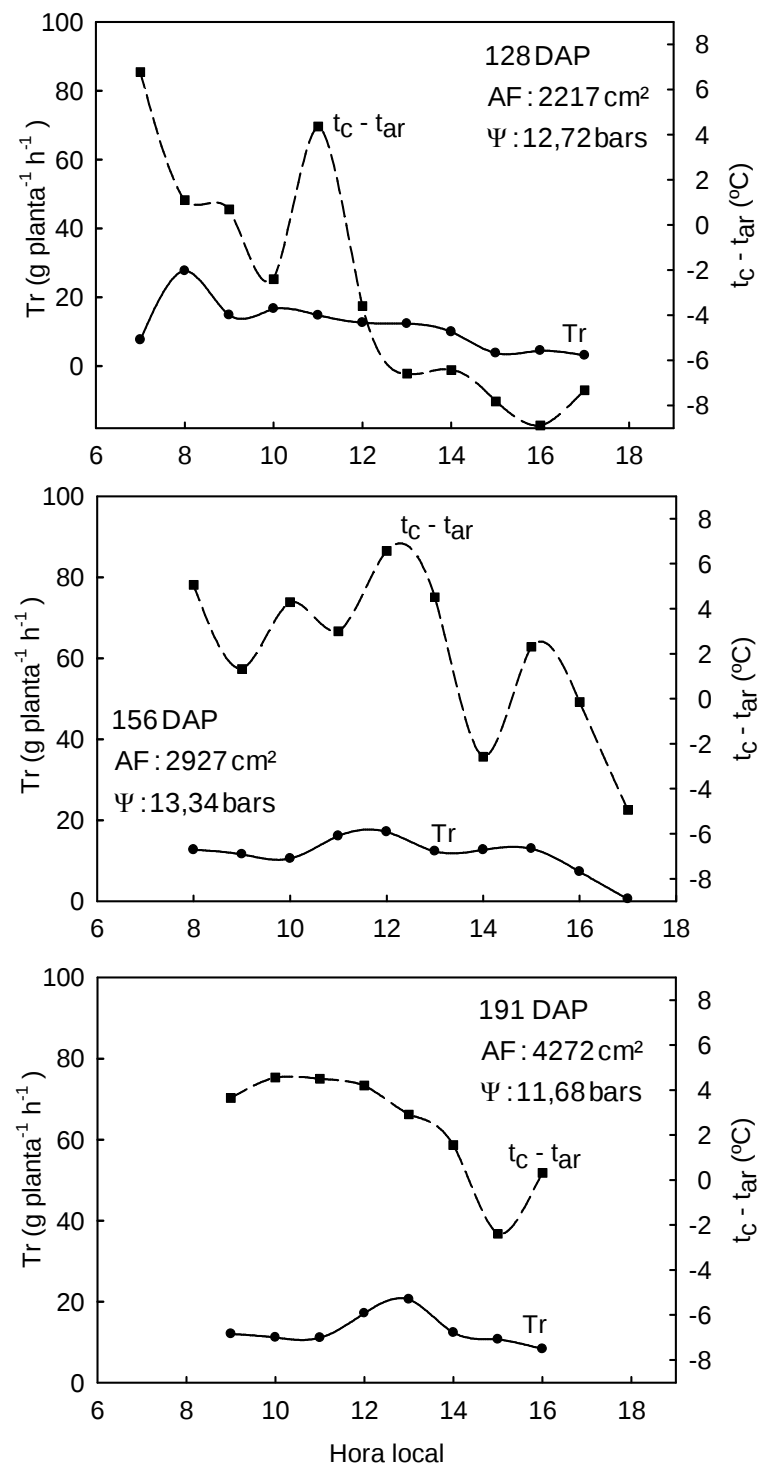


Figura 21 – Valores horários de transpiração (Tr) e diferença de temperatura ($t_c - t_{ar}$) correspondente para cana-de-açúcar (cultivar RB867515), em 128, 156 e 191 dias após o plantio, com tensões matriciais de 12,72, 13,32 e 11,68 bars, respectivamente, sob estresse hídrico severo.

A transpiração diária foi de 128, 114 e 113 g planta⁻¹ dia⁻¹, para 128, 156 e 191 DAP, respectivamente, os quais são bem inferiores aos valores medidos no tratamento sem restrição hídrica e com estresse moderado. Comparado com o experimento sem estresse hídrico, houve reduções na transpiração diária de 63, 74 e 73%, respectivamente. Segundo Silva (2009), sob condições de baixa disponibilidade de água no solo, a cana-de-açúcar, provavelmente, tende a fechar os estômatos visando reduzir a perda de água, resultando em uma maior transferência de calor sensível da superfície da cultura para a atmosfera.

Da mesma forma que nos experimentos descritos anteriormente, nestes três dias avaliados, a R_g variou bastante devido à nebulosidade, o que, conseqüentemente, influenciou a taxa transpiratória das plantas. Contudo, a transpiração atingiu valores máximos de aproximadamente 28, 18 e 20 g planta⁻¹ h⁻¹, para 128, 156 e 191 DAP, respectivamente. No período da tarde, os valores apresentam queda prosseguindo assim até o fim do dia.

Conduzindo experimento com a cultura da festuca, Al-Faraj et al. (2001) constataram que, com o decréscimo da disponibilidade hídrica, ocorreu redução na taxa transpiratória e aumento na temperatura foliar.

4.4.3.3. Linha-base sob condições de estresse hídrico severo

Na Figura 22 são apresentadas as regressões lineares entre $t_c - t_{ar}$ e o déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar, para duas faixas de radiação solar incidente, obtidas de plantas sob condições de estresse hídrico severo. Para isto, foram consideradas as observações obtidas quando a tensão de água no substrato foi superior a 11 bars.

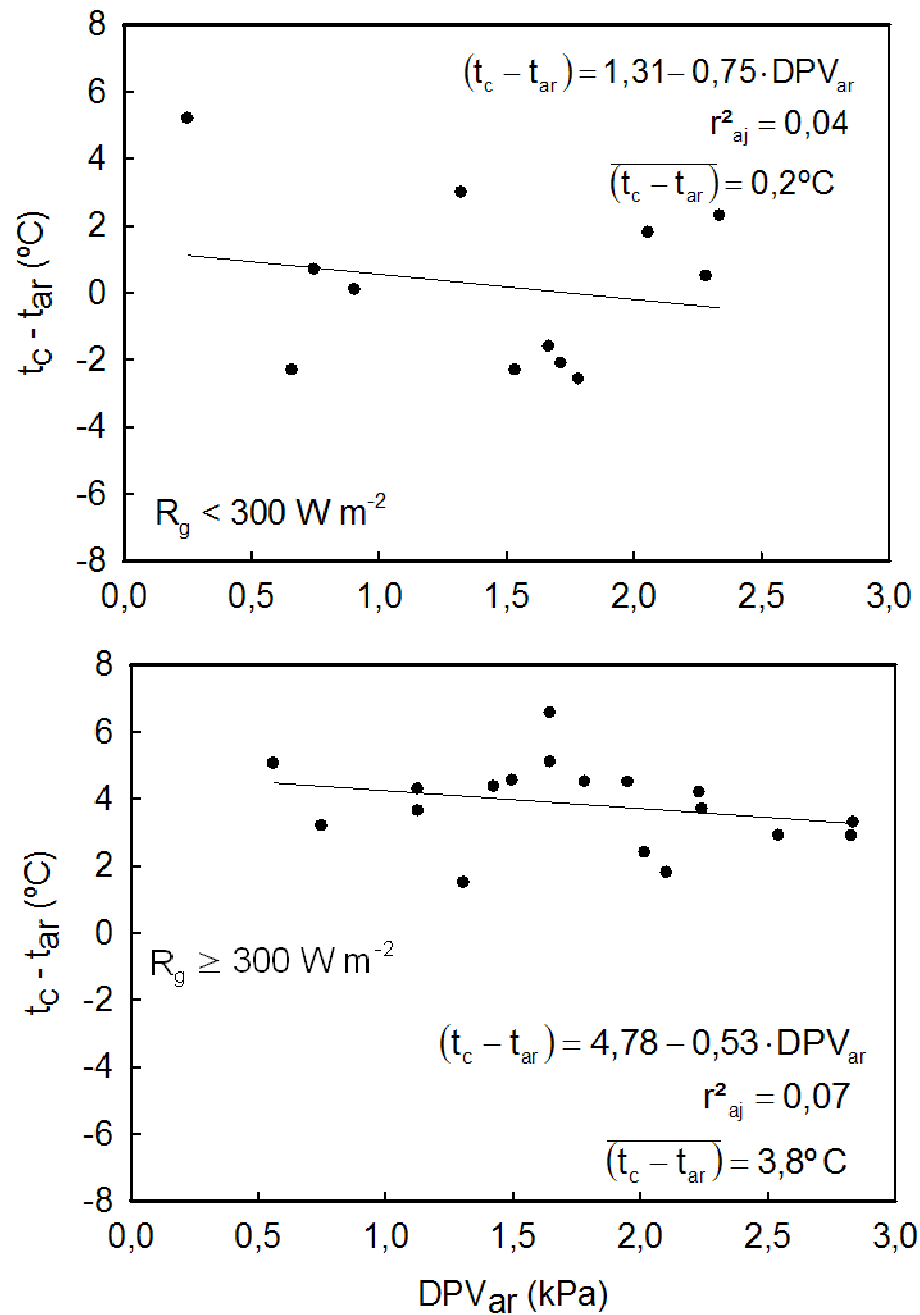


Figura 22 – Relações entre a diferença de temperatura cultura-ar ($t_c - t_{ar}$) e o déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), para a cultura da cana-de-açúcar (cultivar RB867515), sob estresse hídrico severo (tensão > 11 bars) e duas faixas de radiação solar incidente (R_g).

A inclinação destas linhas de regressão são menos negativas comparadas com as das Figuras 15 e 16, em boas condições de suprimento hídrico, e com a da Figura 19, correspondente a condições de estresse hídrico moderado. Todavia, o coeficiente de determinação (r^2), da mesma forma que no tratamento com estresse moderado, é muito baixo, 0,04 e 0,07, para a faixa inferior a 300 W m^{-2} e igual ou superior a 300 W m^{-2} , respectivamente. Conduzindo experimento com a cultura da festuca, Al-Faraj et al. (2001) também obtiveram coeficientes de determinação (r^2) baixos para plantas mantidas em estresse hídrico severo. Os autores encontraram 0,16 e 0,08, para níveis de radiação solar incidente de 377 e 585 W m^{-2} , respectivamente. As médias da diferença $t_c - t_{ar}$ foram $0,2^\circ\text{C}$ e $3,8^\circ\text{C}$, para a faixa inferior a 300 W m^{-2} e igual ou superior a 300 W m^{-2} , respectivamente.

Neste nível de estresse hídrico, a água torna-se limitante, mesmo nos períodos do dia quando a demanda evaporativa do ambiente é menor, ou seja, DPV_{ar} baixo, como ocorre no início da manhã e no final da tarde. Com isso, a planta reduz a transpiração e a temperatura foliar se eleva ainda mais devido à absorção da radiação solar incidente.

Pelas estimativas dos modelos apresentados na Figura 22, a temperatura foliar é reduzida em relação à temperatura do ar em $0,7^\circ\text{C}$ para cada 1 kPa de elevação do DPV_{ar} para o nível inferior a 300 W m^{-2} . Em um nível maior de radiação solar incidente, maior que 300 W m^{-2} , a redução é de somente $0,5^\circ\text{C}$ na temperatura foliar para cada 1 kPa de elevação. Para efeito de comparação, no experimento em ausência de estresse hídrico, a redução para cada 1 kPa é de $3,9$ e $3,7^\circ\text{C}$, para $100 < R_g < 300 \text{ W m}^{-2}$ e $300 < R_g < 500 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente.

A linha-base superior $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ foi estabelecida a partir do valor médio da diferença de temperatura que foi de $3,8^\circ\text{C}$ para valores de R_g igual ou superior a 300 W m^{-2} , uma vez que as equações de regressão da Figura 22 não foram significativas ao nível de 5%. Nestas condições de estresse hídrico, a transpiração das plantas é extremamente baixa e o DPV_{ar} praticamente não tem influência no processo de resfriamento das folhas.

Coincidentemente, Lebourgeois et al. (2010), conduzindo experimento com cana-de-açúcar (cv. R570) na Ilha da Reunião no Oceano Índico, também encontraram o valor de $3,8^\circ\text{C}$ para a linha-base superior para a cultura de

cana-de-açúcar (cv. R570). Todavia, este foi o maior valor da diferença $t_c - t_{ar}$ encontrado por estes pesquisadores. Por outro lado, Khera e Sandhu (1986) estabeleceram o limite superior em função da temperatura do ar, com valores de 4,1 e 5,9°C para as temperaturas do ar de 30 e 45°C, respectivamente. Boroomand-Nasab et al. (2005) adotaram o limite superior como sendo 1°C acima da temperatura do ar.

4.5. Índice de estresse hídrico para a cultura de cana-de-açúcar

A Figura 23 apresenta os limites superior $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ e inferior $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ de $t_c - t_{ar}$ em função de DPV_{ar} , para o modelo IEHC (Índice de Estresse Hídrico da Cultura). A linha-base inferior foi obtida pela equação de regressão da Figura 15, para condições em que $R_g > 500 \text{ W m}^{-2}$. Já a linha-base superior $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ foi assumida com base no valor de 3,8°C.

Segundo Jackson et al. (1981), a partir das linhas bases de temperatura, inferior e superior, a disponibilidade de água para uma dada cultura poderia ser estimada por meio da normalização do domínio da diferença de temperatura “ $t_c - t_{ar}$ ”, Equação 9. Esta normalização para a cultura da cana-de-açúcar é dada por:

$$IEHC = \frac{(t_c - t_{ar}) - [5,23 - 3,47 \cdot DPV_{ar}]}{3,8 - [5,23 - 3,47 \cdot DPV_{ar}]} \quad (16)$$

em que $(t_c - t_{ar})$ é a diferença entre as temperaturas foliar e do ar, em °C, e DPV_{ar} é o déficit de pressão de saturação do vapor d’água no ar, em kPa. No entanto, deve-se salientar que este IEHC é válido para R_g superior a 500 W m^{-2} .

Idso et al. (1981) propuseram que o IEHC estaria compreendido entre 0 e 1, sendo igual a zero quando o estresse é nulo, ou seja, a planta transpira em sua taxa potencial. IEHC é igual a 1 quando o estresse é máximo, isto é, a transpiração é nula.

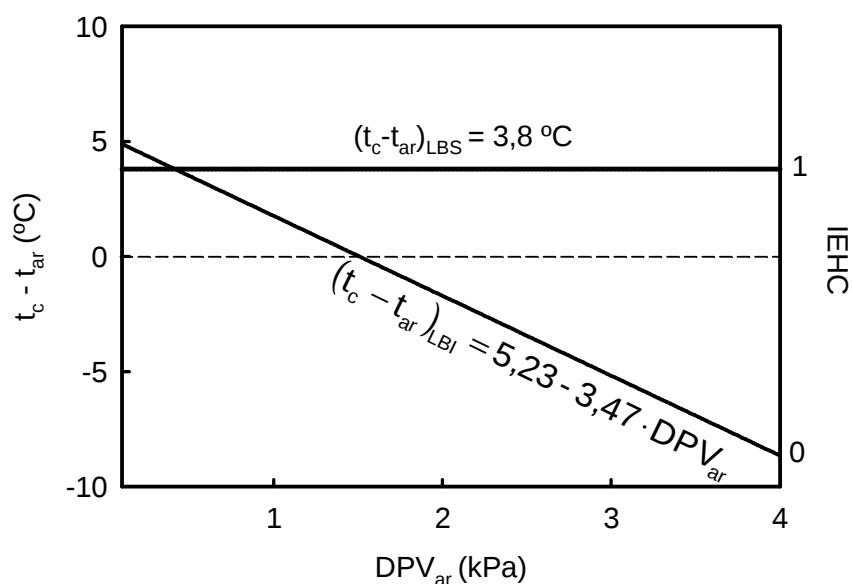


Figura 23 – Representação gráfica do domínio da diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$ em função do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar}).²

O IEHC é amplamente utilizado, pois requer somente três variáveis para ser aplicado (DPV_{ar} , t_{ar} e t_c), sendo utilizado como ferramenta no manejo da irrigação em várias culturas, especialmente milho (IRMAK et al., 2000), soja (NIELSEN, 1990; FERNANDES; TURCO, 2003) e trigo (GONTIA; TIWARI, 2008).

Existem poucos estudos sobre a aplicação do IEHC para a cultura de cana-de-açúcar, destacando-se Khera e Sandhu (1986), Boroomand-Nassab et al. (2005) e Lebourgeois et al. (2010), contudo, nenhum realizado no Brasil.

Ao longo do dia, a posição a linha-base inferior sofre alterações, sendo dependente da radiação solar incidente no momento. Segundo Testi et al. (2008), isto resulta em mudanças nos valores do IEHC.

Para o cálculo deste índice em diferentes condições do período diurno, existe a necessidade de uma linha-base inferior para diferentes níveis de

² Os limites do domínio de temperatura foram estabelecidos para estimativa do índice de estresse hídrico (IEHC) para a cultura da cana-de-açúcar, a partir de medições realizadas em plantas mantidas sob condições hídricas plenas ($(t_c - t_{ar})_{LBI}$ com valores de radiação solar global incidente (R_g) acima de 500 W m^{-2} , e sob restrições hídricas severas próximas ao ponto de murcha permanente ($t_c - t_{ar})_{LBS}$.

radiação solar incidente. A Figura 24 apresenta os limites superior $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ e inferior $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ de $t_c - t_{ar}$ em função de DPV_{ar} , os quais foram utilizados para determinação do IEHC. O limite inferior foi obtido pela equação (15), utilizando, neste caso, valores de R_g de 100, 300 e 500 $W m^{-2}$ (Figura 16). A linha-base superior $(t_c - t_{ar})_{LBS}$ utilizada foi de 3,8°C. Portanto, o IEHC para diferentes níveis de radiação solar incidente é dado por:

$$IEHC = \frac{(t_c - t_{ar}) - [0,01 \cdot R_g - 3,32 \cdot DPV_{ar}]}{3,8 - [0,01 \cdot R_g - 3,32 \cdot DPV_{ar}]} \quad (17)$$

em que $(t_c - t_{ar})$ é a diferença entre as temperaturas foliar e do ar, em °C; R_g , radiação solar global, em $W m^{-2}$; e DPV_{ar} , déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar, em kPa.

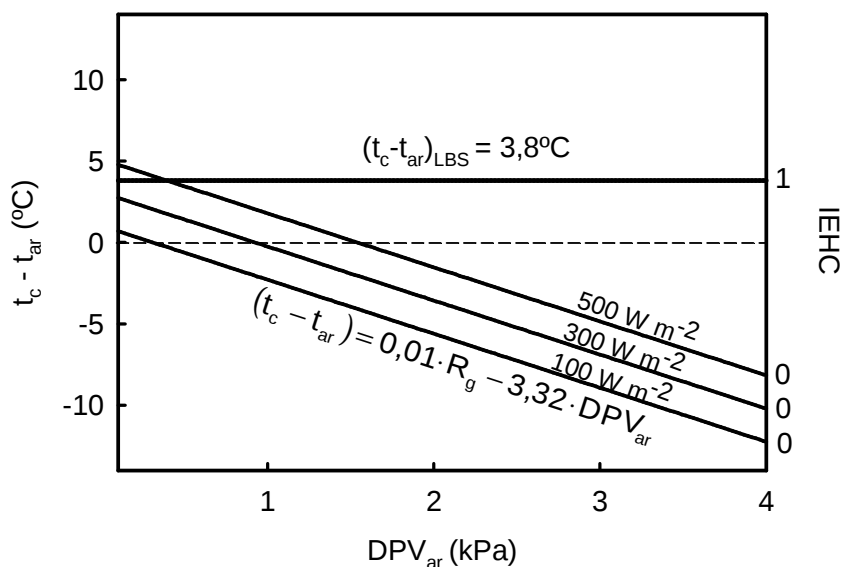


Figura 24 – Representação gráfica do domínio da diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$, em função do déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar (DPV_{ar}), para três níveis de radiação solar global incidente (R_g).³

³ Os limites do domínio de temperatura foram estabelecidos para estimativa do índice de estresse hídrico (IEHC) para a cultura da cana-de-açúcar, a partir de medições realizadas em plantas mantidas sob condições hídricas plenas $(t_c - t_{ar})_{LBI}$ e sob restrições hídricas severas próximas ao ponto de murcha permanente $(t_c - t_{ar})_{LBS}$.

5. CONCLUSÕES

Sob condições parcialmente nubladas, que predominaram na maior parte do período experimental, a temperatura foliar da cana-de-açúcar sofreu alterações expressivas, em decorrência de alterações abruptas dos valores de radiação solar global incidente (R_g). No presente experimento, as alternâncias dos valores de R_g tiveram impactos negativos nos coeficientes de determinação da regressão linear simples entre a diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$ e o déficit de saturação da pressão de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), e da regressão linear múltipla entre $t_c - t_{ar}$ e DPV_{ar} e R_g .

Em condições de cultivo sem estresse hídrico ($\Psi < 0,5$ bars), para os horários próximos ao meio-dia, quando os níveis de R_g estão acima de 500 W m^{-2} e, portanto, pode-se desprezar o efeito desta variável, a temperatura foliar sofre reduções de aproximadamente $3,5^\circ\text{C}$ para cada aumento de 1 kPa no DPV_{ar} . No entanto, quando todos os valores experimentais de R_g e de DPV_{ar} são considerados, a temperatura foliar apresenta incrementos de aproximadamente $1,0^\circ\text{C}$ para cada aumento de 100 W m^{-2} da R_g e sofre diminuições de $3,3^\circ\text{C}$ para cada elevação de 1 kPa no DPV_{ar} . Assim, a linha de regressão obtida com estes parâmetros representa uma estimativa do limite inferior do índice de estresse hídrico da cultura (IEHC).

Sob restrição hídrica moderada e severa, constatou-se uma redução do efeito do DPV_{ar} na diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$, evidenciada pela diminuição progressiva da inclinação das retas de regressão e redução da transpiração.

Em condições de estresse severo ($\Psi > 11,0$ bars), o DPV_{ar} praticamente não tem influência na diferença $t_c - t_{ar}$. Assim, para condições caracterizadas por baixa velocidade do ar e valores de R_g acima de 300 W m^{-2} , o valor médio da diferença de temperatura $t_c - t_{ar}$ é de $+3,8^\circ\text{C}$. Este valor representa uma estimativa do limite superior do índice de estresse hídrico (IEHC) para a cultura da cana-de-açúcar (cv. RB867515).

O IEHC é uma ferramenta de grande importância no manejo adequado de água, visando atender os requerimentos da cultura da cana-de-açúcar em cada fase fenológica. Com a redução dos efeitos do estresse hídrico, há aumento da produtividade e a sustentabilidade do sistema de produção.

REFERÊNCIAS

AL-FARAJ, A.; MEYER, G. E.; HORST, G. L. A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making – a traditional method. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 31, p. 107-124, 2001.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. FAO Rome, Italy, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage, 56).

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. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

ARGENTON, P. E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na região de Piracicaba, São Paulo**. 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 1981. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. In: PLANALSUCAR. Coordenadoria Regional Sul. Araras: COSUL, 1977. 122 p.

BARTZANAS, T.; TCHAMITCHIAN, M.; KITTAS, C. Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy consumption. **Biosystems Engineering**, Oxford, v. 91, n. 4, p. 487-499, 2005.

BERLINER, P.; OOSTERHUIJUS, D. M.; GREEN, G. C. Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 31, p. 219-230, 1984.

BONNETT, G. D. Rate of leaf appearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. **Journal Plant Physiology**, Amsterdam, n. 25, p. 829-839, 1998.

BOROOMAND-NASAB, B.; KASHKULI, H. A.; RASHID ZADEH, F. Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference for sugarcane. **Crop Research**, Hisar, v. 30, p. 355-359, 2005.

BOULARD, T. et al. Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 125, p. 225-239, 2004.

BRASIL. Empresa de Pesquisa. **Potencial de redução de emissões de CO₂ em projetos de produção e uso de biocombustíveis**. Brasília, 2005. 66 p.

COHEN, Y. et al. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 56, p. 1843-1852, 2005.

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).

EHRLER, W. L. Cotton leaf temperature as related to soil water depletion and meteorological factors. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 404-409, 1973.

EMEKLİ, Y. et al. Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, n. 3, p. 205-212, 2007.

FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P. Utilização do índice de estresse hídrico (CWSI) na detecção de estresse hídrico em cultura de soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 41-52, 2003.

GONTIA, N. K.; TIWARI, K. N. Development of crop water stress index of wheat crop for scheduling irrigation using infrared thermometry. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 1144-1152, 2008.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **STAB Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 5, p. 32-34, 1999.

IDSO, S. B. Non-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 27, p. 59-70, 1982.

IDSO, S. B. et al. Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 24, p. 45-55, 1981.

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.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

IRMAK, S.; HAMAN, D. Z.; BASTUG, R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 1221-1227, 2000.

IRVINE, J. E. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugar cane yield. **Crop Science**, California, v. 15, p. 671-676, 1980.

JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress In: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982. p. 43-85.

JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, Washington, v. 13, p. 651-656, 1977.

JACKSON, R. D.; ISON, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER JUNIOR, R. J. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Resources Research**, Washington, v. 17, p. 1133-1138, 1981.

JALALI-FARAHANI, H. R. et al. Crop water stress index models for bermudagrass turf: a comparison. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 6, p. 1210-1217, 1993.

KATSOULAS, K.; BAILLE, A.; KITTAS, C. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 106, p. 233-247, 2001.

KHERA, K. L.; SANDHU, B. S. Canopy temperature of sugarcane influenced by irrigation regime. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 37, p. 245-258, 1986.

LARCHER, W. A planta sob estresse. In: LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos, SP: Rima, 2000. p. 341-478.

LEBOURGEOIS, V. et al. Towards using a thermal infrared index combined with water balance modeling to monitor sugarcane irrigation in a tropical environment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97, p. 75-82, 2010.

LIU, D. L.; HEYLAR, K. R. Simulation of seasonal stalk water content and fresh weigh yield of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 82, p. 59-73, 2003.

MAHAN, J. R. et. al. Determination of temperature and time thresholds for BIOTIC irrigation of peanut on the southern high plains of Texas. **Irrigation Science**, New York, v. 23, n. 4, p. 145-152, 2005.

MARCHIORI, L. F. S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. 273 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA, J. R. G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

MOLINA-AIZ, F. D.; VALERA, D. L.; ÁLVAREZ, A. J. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 125, p. 33-51, 2004.

MOLLER, M. et al. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, p. 827–838, 2007.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.

NABLE, R. O.; ROBERTSON, M. J.; BERTHELSEN, S. Response of shoot growth and transpiration to soil drying in sugarcane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 207, p. 59-65, 1999.

NEVES, M. F.; TROMBINI, V. G.; CONSOLI, M. **Mapeamento e quantificação do setor sucroenergético em 2008**. Ribeirão Preto: Centro de Pesquisa e Projetos em Marketing e Estratégia da USP, 2009. 34 p.

NIELSEN, D. C. Scheduling irrigations for soybeans with the Crop Water Stress Index (CWSI). **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 23, p. 103-116, 1990.

ORTA, A. H. et al. Use of infrared thermometry for developing baseline equations and scheduling irrigation in wheat. **Cereal Research Communications**, Szeged, v. 32, n. 3, p. 363-370, 2004.

ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Eds.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 71-79.

O'TOOLE, J. C.; HATFIELD, J. L. Effect of the wind on the crop water stress index derived by infrared thermometry. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 811-817, 1983.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Variable upper and lower crop water stress index baselines for corn and soybean. **Irrigation Science**, New York, v. 25, p. 21-32, 2006.

PAYERO J. O.; NEALE, C. M. U.; WRIGHT, J. L. Non-water-stressed baselines for calculating crop water stress index (CWSI) for alfalfa and tall fescue grass. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 2, p. 653-661, 2005.

PEÑUELAS, J. et al. Remotely measured canopy temperature of greenhouse strawberries as indicator of water status and yield under mild and very mild water stress conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 58, p. 63-77, 1992.

PEREIRA, A. R.; BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. Condicionamento climático da indução ao florescimento em cana-de-açúcar. **Boletim Técnico PLANALSUCAR**, Piracicaba, v. 5, n. 3, p. 5-14, 1983.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PINTER JUNIOR, R. J.; REGINATO, R. J. A thermal infrared technique for monitoring cotton water stress and scheduling irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, p. 1651-1655, 1982.

ROBERTS, J.; NAYAMUTH, R.A.; BATCHELOR, C.H.; SOOPRAMANIEN, G.C. Plant-water relations of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under a range of irrigated treatments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, p. 95-115, 1990.

RODRIGUES, L. **O processo de terceirização e a presença de arranjos institucionais distintos na colheita da cana-de-açúcar**. 2006. 120 p. Dissertação (Mestrado em Economia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

RODRIGUES, S. B. S. **Análise do uso de água em unidades de produção de mudas de eucalipto**. 2007. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: _____. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 373-431.

SILVA, T. G. F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semi-árido brasileiro**. 2009. 168 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, A. L. C.; COSTA, W. A. J. M. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. **Tropical Agricultural Research**, v. 16, p. 1-12, 2004.

SINCLAIR, T. R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE JUNIOR, J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 171-178, 2004.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C. N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

SMITH, D. M. **Growth and function of the sugarcane root system**. Amsterdam: Elsevier, 2005. 35 p.

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

SOARES, R. A. B. et al. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, p. 38-41, 2004.

STEIDLE NETO, A. J. et al. Avaliação de um circuito eletrônico para medição da condutividade elétrica de soluções nutritivas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 427-435, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TESTI, L. et al. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. **Irrigation Science**, New York, v. 26, p. 395-405, 2008.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

WANG, L.; QIU, G. Y.; CHEN, G. Y. S. Application of a new method to evaluate crop water stress index. **Irrigation Science**, New York, v. 24, p. 49-54, 2005.

WANG, S.; BOULARD, T.; HAXAIRE, R. Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 96, p.181-188, 1999.

WIEGAND, C. L., SWANSON, W. A. Time constants for thermal equilibration of leaf, canopy, and soil surfaces with change in insolation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 722-724, 1973.

YANG, X. et al. The microclimate and transpiration of a greenhouse cucumber crop. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 6, p. 2143-2150, 1989.

ZOLNIER, S. **Dynamic misting control techniques for poinsettia propagation**. 1999. Thesis (Biosystems and Agricultural Engineering Department) – University of Kentucky, Lexington, KY.

ZOLNIER, S. Automação de sistemas de cultivo em substrato. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATO PARA PLANTAS, 4, 2004, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV, 2004. p. 158-189.

ZOLNIER, S. et al. Non-water-stressed baseline as a tool for dynamic control of misting system for propagation of poinsettias. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, n. 1, p. 137-147, 2001.