

EVANDRO LIMA DA SILVEIRA BATISTA

**EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO SOBRE O CRESCIMENTO
DE CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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
2012

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

T

B333e
2012

Batista, Evandro Lima da Silveira, 1986-
Efeito do estresse hídrico sobre o crescimento de cultivares
de cana-de-açúcar / Evandro Lima da Silveira Batista. –
Viçosa, MG, 2012.
xviii, 97f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Sérgio Zolnier

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 72-77

1. Meteorologia agrícola. 2. Crescimento (Plantas).
3. *Saccharum officinarum*. 4. Cana-de-açúcar - Crescimento.
5. Cana-de-açúcar - Modelos matemáticos. 6. Plantas - Efeito
da umidade do solo. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515


EVANDRO LIMA DA SILVEIRA BATISTA


**EFEITO DO ESTRESSE HÍDRICO SOBRE O CRESCIMENTO DE
CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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: 20 de julho de 2012.


Thieres George Freire da Silva


Márcio Henrique Pereira Barbosa


Sérgio Zolnier
(Orientador)

Aos meus pais, Maria Geralda e Antônio Firmino.
Aos meus irmãos Míriam, Marcelo e Márcio.
Aos meus sobrinhos Gabriel, João Vitor e Sofia.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Sérgio Zolnier, pela orientação, profissionalismo e comprometimento com o trabalho, que muito contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal.

Aos professores coorientadores Aristides Ribeiro e Gustavo Bastos Lyra, pelas sugestões e amizade.

Ao Professor Carlos Rodrigues Pereira, pelos valiosos conselhos e pela amizade.

Ao professor Márcio Henrique Pereira Barbosa, pelo apoio na realização do experimento e pelas sugestões.

Ao professor Thieres George Freire da Silva, pelas sugestões e amizade.

À Davi, Poliana e Gabriela, pelo bom convívio, auxílio na condução do experimento e principalmente pela amizade.

À Graça, pela competência, auxílio profissional e amizade.

Aos meus colegas de curso, na pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pelo agradável convívio durante a realização do curso.

Ao funcionário do Departamento de Fitotecnia Macabeu, pelo apoio na condução do experimento.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelos sólidos conhecimentos transmitidos durante minha graduação.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Evandro Lima da Silveira Batista, filho de Maria Geralda da Silva Batista e Antônio Firmino Batista, nasceu em 08 de abril de 1986, na cidade do Rio de Janeiro.

Em agosto de 2004 iniciou o curso de Agronomia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, localizada na cidade de Seropédica-RJ. Durante quatro anos, participou de atividades de iniciação científica na qualidade de bolsista. Gradou-se no primeiro semestre de 2010.

Em agosto de 2010, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa-UFV, em nível de mestrado, submetendo-se à defesa de tese em 20 de julho de 2012.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo geral.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1. Cana-de-açúcar.....	5
3.2. Efeitos do estresse hídrico nas plantas.....	6
3.3. Efeitos do estresse hídrico na cana-de-açúcar.....	8
3.4. Análise de crescimento.....	11
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1. Cultivares.....	15
4.2. Cultivo em condições de campo.....	16
4.2.1. Aspectos gerais.....	16
4.2.2. Caracterização físico-química do solo.....	18
4.2.3. Dados da parte aérea da cana-de-açúcar.....	19
4.2.3.1. Dados de Biomassa seca.....	19
4.2.3.2. Dados biométricos.....	21
4.2.4. Medição dos elementos meteorológicos e sistema de aquisição de dados.....	22
4.2.5. Ajuste e avaliação do desempenho de modelos de crescimento.....	23

4.2.5.1. Graus-Dia acumulados.....	23
4.3. Cultivo em casa-de-vegetação.....	24
4.3.1. Aspectos gerais.....	24
4.3.2. Plantio e condução do experimento em casa de vegetação.....	25
4.3.2. Avaliações biométricas e estimativa da biomassa seca da cana-de-açúcar.....	27
4.3.3. Índices morfofisiológicos.....	29
4.3.4. Avaliação da matéria seca da parte aérea.....	30
4.3.5. Monitoramento dos elementos meteorológicos e sistema de aquisição de dados.....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1. Experimento em condições de campo.....	35
5.1.1. Elementos meteorológicos.....	35
5.1.2. Ajuste dos modelos expolinear, logístico e Gompertz aos valores observados de matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar.....	37
5.1.3. Estimativa do acúmulo de matéria seca por meio do modelo expolinear.....	47
5.2. Experimento em casa-de-vegetação.....	50
5.2.1. Elementos meteorológicos.....	50
5.2.2. Massa seca da parte aérea.....	52
5.2.2.1. Ajuste do modelo sigmoidal aos dados de massa seca da parte aérea.....	52
5.2.2.2. Taxas de crescimento absoluto e relativo.....	56
5.2.3. Estatura dos colmos.....	60
5.2.3.1. Ajuste do modelo sigmoidal aos dados de estatura dos colmos.....	60
5.2.3.2. Taxas de alongação do colmo e alongação relativa do colmo.....	62
6. CONCLUSÕES.....	70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
APÊNDICE.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Análise física do solo.....	18
Tabela 2 -	Análise química do solo.....	18
Tabela 3 -	Número de avaliações, dias após o plantio (DAP) e data das amostragens realizadas no experimento em condições de campo, Viçosa-MG.....	20
Tabela 4 -	Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB92579, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012.....	37
Tabela 5 -	Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB867515, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012.....	37
Tabela 6 -	Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB928064, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012.....	38

Tabela 7 -	Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB855453, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012.....	38
Tabela 8 -	Parâmetros do modelo sigmoidal (a , b e x_0) e coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}), para o acúmulo de matéria seca da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 10°C, nas condições de casa-de-vegetação, Viçosa-MG.....	53
Tabela 9 -	Resumo da análise de variância referente à matéria seca da parte aérea (MSP), acumulada aos 157 DAP, de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidos a quatro níveis de estresse hídrico.....	55
Tabela 10 -	Valores médios da massa seca da parte aérea, acumulada aos 157 DAP, para quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidos a quatro níveis de estresse hídrico.....	56
Tabela 11-	Parâmetros estimados pelo modelo sigmoidal (a , b e x_0) e coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}), para a estatura do colmo de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16 °C, Viçosa-MG.....	61
Tabela 12 -	Resumo da análise de variância referente à estatura do colmo, aos 157 DAP, de quatro cultivares submetidos a quatro níveis de estresse hídrico.....	64

Tabela 13 - Valores médios da estatura dos colmos dos cultivares submetidos a diferentes níveis de estresse, aos 157 DAP..... 64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Vista geral do experimento em condições de campo.....	17
Figura 2 -	Detalhes da amostragem das plantas no cultivo de campo, Viçosa-MG.....	21
Figura 3 -	Detalhes das medidas biométricas realizadas em laboratório: diâmetro do colmo (a), comprimento e largura foliar (b) e área foliar (c).....	22
Figura 4 -	Vista geral do cultivo da cana-de-açúcar em vasos nas condições de casa-de-vegetação.....	26
Figura 5 -	Vista geral do sistema de drenagem. Perfil hidropônico (a) e vasos para armazenamento do excedente da fertirrigação (b).....	27
Figura 6 -	Tubo de PVC aspirado contendo os sensores eletrônicos: a) temperatura e umidade relativa do ar; b) radiação fotossinteticamente ativa; c) radiação solar global e d) velocidade do ar.....	32
Figura 7 -	Detalhe do sensor Watermark.....	33
Figura 8 -	Interface do programa de aquisição de dados e controle das motobombas de fertirrigação.....	34
Figura 9 -	Sistema de aquisição de dados (a) e controle das motobombas de fertirrigação (b).....	34

- Figura 10 - Variação dos elementos meteorológicos ao longo do período de crescimento dos cultivares de cana-de-açúcar, no ciclo de cana-planta, na localidade de Viçosa-MG. As medidas referem-se aos totais diários de radiação solar global (R_g) e valores médios diários do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) (A); velocidade do ar (u) (B); temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}) (C). Adicionalmente, são apresentados os totais diários da precipitação e irrigação (D)..... 36
- Figura 11 - Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB92579..... 43
- Figura 12 - Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB867515..... 44
- Figura 13 - Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB928064..... 45

Figura 14 -	Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB855453.....	46
Figura 15 -	Massas secas acumuladas da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar, estimadas pelo modelo expolinear, utilizando-se, como variável independente, dias após o plantio para as condições de Viçosa, MG.....	48
Figura 16 -	Massas secas acumuladas da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar, estimadas pelo modelo expolinear, utilizando-se, como variável independente, graus-dia acumulados após o plantio para as condições de Viçosa, MG.....	49
Figura 17 -	Valores diários de radiação solar global (R_g), déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), velocidade do ar (u), temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}), ao longo do período de formação dos cultivares de cana-de-açúcar em casa-de-vegetação, Viçosa, MG.....	51
Figura 18 -	Massa seca da parte aérea (MSP) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), moderado (C) e severo (D), ao longo do período de formação, em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD) sob condições de casa-de-vegetação, Viçosa-MG.....	54

Figura 19 -	Taxa de crescimento absoluto da cultura (TCC) e número de irrigações aplicadas aos cultivares de cana de açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 10°C, para as condições de campo, Viçosa-MG.....	58
Figura 20 -	Taxa de crescimento relativo (TCR) dos cultivares de cana de açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 10°C, para as condições de campo, Viçosa-MG.....	60
Figura 21 -	Variação da estatura dos colmos de cultivares de cana-de-açúcar submetidos aos tratamentos com ausência de estresse hídrico (A), estresse leve (B), moderado (C) e severo (D), ao longo do período de formação, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16°C.....	62
Figura 22 -	Estatura dos colmos de cultivares de cana-de-açúcar, submetidos aos diferentes níveis de estresse hídrico nas condições de casa-de-vegetação, Viçosa-MG.....	65
Figura 23 -	Taxa de alongação do colmo (TEC) e número de irrigações aplicadas aos cultivares de cana-de-açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 16°C, Viçosa-MG.....	66

Figura 24 - Taxa de alongação relativa do colmo (TCH) e número de irrigações aplicadas aos cultivares de cana de açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 16°C, Viçosa-MG..... 68

RESUMO

BATISTA, Evandro Lima da Silveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2012. **Efeito do estresse hídrico sobre o crescimento de cultivares de cana-de-açúcar.** Orientador: Sérgio Zolnier. Coorientadores: Aristides Ribeiro e Gustavo Bastos Lyra.

O presente estudo teve como objetivos principais: 1) Ajustar os modelos de crescimento expolinar, logístico e Gompertz ao acúmulo de matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar para os cultivares RB92579, RB855453, RB867515 e RB928064; e 2) Determinar as taxas de crescimento dos cultivares mencionadas sob distintos níveis de estresse hídrico, referidos no presente trabalho como: ausência de estresse (10 kPa), estresse leve (60 kPa), moderado (90 kPa) e severo (120 kPa). Foram conduzidos dois experimentos independentes, sendo o primeiro em condições de campo, e o segundo em casa-de-vegetação, ambos localizados na Universidade Federal de Viçosa. Os dados do ambiente e da planta foram coletados no período de 26/08/11 até o dia 18/05/12 (primeiro experimento) e 18/12/11 até 22/05/12 (segundo experimento). No primeiro experimento, os modelos de crescimento (expolinar, logístico e Gompertz) foram capazes de simular bem a matéria seca acumulada pelos cultivares ao longo do período estudado. Os valores de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) estiveram acima de 92,09% para todos os modelos avaliados. A partir do ajuste dos parâmetros do modelo de crescimento expolinar, constatou-se que, ao final do período experimental, a massa seca foi ligeiramente maior para o cultivar RB855453 em comparação ao RB867515, os quais se destacaram em relação aos cultivares RB928064 e RB92579. Em decorrência do efeito do estresse hídrico no crescimento e acúmulo de massa seca da parte aérea da cana-de-açúcar sob condições de casa-de-vegetação, foi constatado que o modelo sigmoidal com três parâmetros proporcionou melhor ajuste aos dados de matéria seca e de

estatura dos colmos. Na ausência de estresse hídrico, os valores máximos da taxa de crescimento da cultura (TCC) estiveram compreendidos entre 0,22 e 0,31 g °Cd⁻¹, enquanto os valores máximos da taxa de alongação do colmo (TEC) estiveram compreendidos entre 0,20 e 0,25 cm °Cd⁻¹, independente da cultivar. Em contraste, sob estresse severo, os valores máximos da TCC estiveram entre 0,050 e 0,068 g °Cd⁻¹ e da TEC entre 0,07 e 0,09 cm °Cd⁻¹, também independente do cultivar avaliado. Sob ausência de estresse hídrico, a TCC máxima do cultivar RB867515 foi em média cerca de 7,5, 36,8 e 40,8 % maior que a TCC máxima dos cultivares RB855453, RB92579 e RB928064, respectivamente. Nessa condição, esse cultivar alcançou a TEC máxima somente aos 1100 °Cd, enquanto para os demais cultivares, os valores máximos foram observados aos 900 °Cd, aproximadamente.

ABSTRACT

BATISTA, Evandro Lima da Silveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2012. **Effect of water stress on growth of sugarcane cultivars.** Adviser: Sérgio Zolnier. Co-advisers: Aristides Ribeiro and Gustavo Bastos Lyra.

The main objectives of the present study were: 1) to evaluate the goodness of fit of growth models to determine the variation of the dry mass for sugarcane, cultivars RB92579, RB867515, RB928064 and RB855453; and 2) determine the growth rates of the mentioned cultivars subjected to different levels of water stress, denoted in the present work as: unstressed (10 kPa), mild (60 kPa), moderate (90 kPa) and severe (120 kPa). Two independent experiments were carried out: the first one under field conditions and the second one in a greenhouse, both located at the Federal University of Viçosa (Brazil). Environmental and plant data were collected from October 26 (2011) to May 18 (2012) for the first experiment and December 18 (2011) to May 22 (2012) for the second experiment. In the first experiment, the growth models (exponential, logistic and Gompertz) were capable of simulating well accumulated dry matter of the cultivars, during the studied period. Values of the adjusted determination coefficient were above 92.09% for all evaluated models. Based on the adjusted parameters of the exponential model, it was observed, at the end of the experimental period, that the dry mass was lightly superior for the cultivar RB855453 compared to RB867515, which outperformed the cultivars RB928064 and RB92579. Due to the water stress effect on the growth and accumulated dry mass of sugarcane under greenhouse conditions, it was observed that the sigmoid model with three parameters provided the best fit to the growth and data of plant heights. In the treatments without water stress, the maximum values of culture growth rate (TCC) ranged between 0.22 and 0.31 $\text{g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$, while the maximum values of stem elongation rate (TEC) were between 0.20 and 0.25 $\text{cm } ^\circ\text{Cd}^{-1}$, regardless of cultivar. In contrast, under severe water

stress, the maximum values of the TCC ranged between 0.050 and 0.068 $\text{g } ^\circ\text{Cd}^{-1}$ and the TEC were between 0.07 and 0.09 $\text{cm } ^\circ\text{Cd}^{-1}$, also regardless of the evaluated cultivar. For the treatment without water stress, the maximum TCC for the RB867515 cultivar were larger than RB855453, RB92579 and RB928064, corresponding to 7.5, 36.8 and 40.8 %, respectively. In that condition, the cultivar RB867515 reached the maximum TEC only at 1100 $^\circ\text{Cd}$, while for the others, the maximum values were observed at 900 $^\circ\text{Cd}$, approximately.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar destaca-se no cenário agrícola do Brasil que, além de ser o maior produtor mundial, é também o líder em produção de açúcar e etanol (BRASIL, 2012). Além da importância do açúcar como *commodity* essencial para o País, o etanol se sobressai como biocombustível alternativo para a matriz energética nacional, sendo menos impactante que os combustíveis fósseis e cada vez mais interessa as nações comprometidas em reduzir a emissão de gases nocivos à saúde humana e de efeito estufa (FAO, 2008).

Em 2011, a área colhida de cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira foi de 8,4 milhões de hectares, que correspondeu a um aumento de 3,9 % em relação à safra anterior. Até o ano de 2019/2020, estima-se que haverá taxa média anual de crescimento de 3,5 % na produção de açúcar, o que representará acréscimo de 15,2 milhões de toneladas em relação ao observado em 2008/2009. Neste mesmo ano, estima-se que a produção do etanol será 62,9 bilhões de litros, cujo destino principal será atender o consumo interno, que deverá ser de 49,6 bilhões de litros (BRASIL, 2010).

Em relação à área total colhida de cana-de-açúcar no Brasil, 8,1% da safra 2011/2012 correspondeu ao estado de Minas Gerais, conferindo-lhe a segunda posição no ranking dos estados produtores, atrás apenas de São Paulo. Nesta safra, a área colhida foi aproximadamente 742,650 mil hectares, 12,6% de acréscimo em relação à anterior (CONAB, 2011). Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2010), o estado dispõe de 11,2 milhões de hectares com condições favoráveis ao cultivo de cana-de-açúcar.

A crescente demanda pelos produtos derivados da cana-de-açúcar tem impulsionado a realização de pesquisas que visam o entendimento da relação de fatores físicos e climáticos do ambiente de cultivo com o crescimento e

desenvolvimento da planta, buscando, assim, a otimização dos recursos ambientais disponíveis.

Atualmente, a maior parte da cana-de-açúcar cultivada no Brasil é em regime de sequeiro. Em decorrência disso, a cultura está sujeita a ocorrência de déficit hídrico em determinados estádios do seu desenvolvimento ou mesmo durante todo o ciclo (LYRA et al., 2012). Isso ocorre devido à irregular distribuição sazonal das chuvas nas regiões produtoras e à ocorrência de veranicos, que são frequentes durante o período chuvoso.

Um manejo adequado pode ser obtido por meio da identificação dos padrões de crescimento, que possibilitam selecionar cultivares adaptados aos diferentes ambientes de produção e que sejam eficientes no uso da água (OLIVEIRA et al., 2010). O potencial produtivo da cana-de-açúcar é expresso à medida que a disponibilidade de água aumenta, cujas respostas serão diferentes entre os cultivares (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Durante o período de crescimento, a cana-de-açúcar passa por quatro estádios fenológicos distintos, denominados germinação, perfilhamento, crescimento intenso e maturação (VAN DILLEWIJN, 1952 apud RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000). Estudos realizados com a cultura sob condições de estresse hídrico têm demonstrado que a fase de perfilhamento, juntamente com a de intenso crescimento, conhecidas como a fase de formação, são as mais críticas quanto aos efeitos da falta de água na produtividade da cultura (SMIT; SINGELS, 2006; ZHAO et al., 2010).

Processos fisiológicos, como o transporte fotoquímico de elétrons, fotossíntese e partição de fotoassimilados são alterados pelo estresse hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2004). Essas alterações resultam em redução das trocas gasosas, do tamanho das plantas e da área foliar e, conseqüentemente, da produtividade (ZHAO et al., 2010; ENDRES et al., 2010;).

Estudos sobre as respostas morfológicas das plantas à deficiência hídrica são de interesse para compreensão dos padrões de crescimento, principalmente do desenvolvimento e acúmulo de massa seca, uma vez que esses estão diretamente relacionados ao rendimento final da cultura.

Diante disso, a análise de crescimento é uma ferramenta extremamente útil, uma vez que possibilita identificar diferenças morfológicas e quantificar a produção líquida resultante do processo fotossintético, facilitando

a compreensão das interações ambiente-planta e a identificação de cultivares apropriados para o crescimento em condições ambientais particulares (BENINCASA, 1988).

Dentre os elementos utilizados para caracterizar o crescimento das plantas, destacam-se o comprimento característico das folhas, a área foliar, a matéria seca e matéria fresca total ou parcial da planta, além do número de unidades estruturais como folhas, frutos e entrenós. Com isso, é possível o cálculo de índices morfofisiológicos para analisar diferenças no crescimento de plantas tais como a taxa de crescimento absoluta da cultura, taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação líquida, razão de área foliar, razão de massa foliar e área foliar específica (SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2005).

No caso específico da cana-de-açúcar, estudos de análise do crescimento têm sido conduzidos em países onde esta espécie é extensivamente cultivada, a fim de determinar os fatores responsáveis pela variação no rendimento final e auxiliar a seleção de variedades eficientes no uso da água (OLIVEIRA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2011a; INMAN-BAMBER; JAGER, 1986; ZHAO et al., 2010; TEJERA et al., 2007). A maioria desses estudos tem correlacionado o crescimento da planta com elementos climáticos (radiação, precipitação, temperatura) e com manejo (adubação, irrigação), possibilitando, assim, a avaliação e a quantificação das taxas de crescimento em diferentes condições ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o ajuste de modelos de crescimento ao acúmulo de matéria seca de cultivares de cana-de-açúcar e o efeito do estresse hídrico nas características morfofisiológicas da cultura.

2.2. Objetivos específicos

- Ajustar os modelos exponencial, logístico e Gompertz ao acúmulo de matéria seca da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar, em condições de campo, utilizando-se dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD) como variáveis independentes.
- Avaliar índices morfofisiológicos de cultivares de cana-de-açúcar, submetidos a distintos níveis de tensão de água no substrato, em casa-de-vegetação.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene, de metabolismo fotossintético C₄, pertencente ao gênero *Saccharum L.* e à família *poacea*, dentro da classe das monocotiledôneas. Os cultivares comerciais atuais, *Saccharum spp.* são híbridos provenientes de cruzamentos entre as espécies *Saccharum officinarum* e *Saccharum spontaneum*, seguidos de novos cruzamentos de *Saccharum officinarum* (CESNIK; MIOCQUE, 2004). Os híbridos cultivados são caracteristicamente robustos e com alto teor de sacarose, cuja propagação se dá de forma vegetativa, sendo adaptados a climas tropicais e subtropicais.

A prolongada estação de crescimento dos trópicos, condições de solo e clima, a colheita do corpo da planta, ao invés do fruto ou semente, e o metabolismo altamente eficiente na conversão da energia radiante em energia química (TAIZ; ZEIGUER, 2004) resultam em rendimento de biomassa extraordinariamente alto, tornando-a uma cultura agrícola de extrema importância comercial para o Brasil.

Durante muitos anos, o principal derivado da planta foi o açúcar, destinado à alimentação humana, sendo que, no entanto, a cerca de 40 anos ocorreu uma transformação do setor. Além do açúcar, as usinas passaram a ter foco na produção do etanol e, mais recentemente, a atenção voltou-se à bioeletricidade, aos alcoolquímicos e à comercialização de créditos de carbono (SOUZA; MACEDO, 2009).

Atualmente, a cana-de-açúcar é cultivada em área superior a 8 milhões de hectares, que são responsáveis pela produção de mais de 600 milhões de toneladas de cana destinadas, principalmente, à fabricação de açúcar e etanol. Nos últimos anos, houve incrementos consideráveis na área plantada e na

produção, em decorrência da entrada de novas unidades industriais e variedades mais produtivas, estimulados pelo aumento das exportações e pela crescente participação dos veículos bicombustíveis na frota automotiva brasileira (SOUZA; MACEDO, 2009).

Dentre os estados produtores, São Paulo lidera o ranking com a maior área colhida destinada à atividade (51,8 %), seguido por Minas Gerais (8,4%), Goiás (7,4%), Paraná (7,1%), Alagoas (5,3%), Mato Grosso do Sul (6,5%) e Pernambuco (3,6%) (CONAB, 2012).

Projeções feitas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2010) preveem crescimento do setor nos próximos anos. Estima-se que a produção de açúcar crescerá à taxa média anual de 3,53% até o ano de 2020, que corresponderá a uma produção de 47 milhões de toneladas, 15 milhões de toneladas a mais que o observado na safra 2008/2009. Neste mesmo ano, a produção projetada de etanol será de 63 bilhões de litros, devido principalmente ao consumo interno, que deverá ser de 50 bilhões de litros (BRASIL, 2010).

3.2. Efeitos do estresse hídrico nas plantas

A água é o principal constituinte vegetal, totalizando cerca de 90% da massa de matéria verde. Além disso, de todos os recursos de que a planta necessita para crescer e funcionar, a água é o mais abundante e, ao mesmo tempo, o mais limitante para produtividade agrícola, uma vez que constitui a matriz e o meio onde ocorre a maioria dos processos bioquímicos essenciais à vida (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A disponibilidade hídrica tem sido a maior força seletiva na evolução das espécies. Assim, a habilidade para lidar com o déficit hídrico é um importante determinante na distribuição natural das plantas e na produtividade das culturas agrícolas. É continuamente perdida para atmosfera pelo processo de evapotranspiração e absorvida do solo pelas raízes, de forma que quando a perda decorrente da evapotranspiração excede a absorção pelas raízes, a planta entra em déficit hídrico (LAWLOR; CORNIC, 2002). Devido à perda contínua de água para a atmosfera, as plantas raramente estão com plena hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Em situações em que o déficit hídrico é leve, a redução na fotossíntese é ocasionada pelo aumento da resistência à difusão do CO₂ pelos estômatos e mesófilo (GALMÉS et al., 2011). O aumento da resistência ocorre devido ao fechamento estomático, em resposta ao declínio no potencial de água na folha, ou à redução no teor de água no solo (SMIT; SINGELS, 2006), ou até mesmo à elevada demanda atmosférica (ENDRES et al., 2010). Essa resposta é esperada em plantas submetidas ao déficit e é considerada uma das primeiras estratégias para impedir a desidratação excessiva das folhas (YORDANOV et al., 2003).

Ainda de acordo com a via fotossintética, ocorrem diferenças no que diz respeito ao controle estomático de plantas submetidas ao estresse hídrico. Nessas condições, as plantas C₄ são mais eficientes em economizar água, devido ao seu maior controle estomático, quando comparadas a plantas C₃. Atteya (2003), avaliando os efeitos da seca em genótipos de milho, cujo metabolismo fotossintético é do tipo C₄, observou que já no início do estresse houve redução na condutância estomática, mesmo antes de haver qualquer mudança no potencial de água na folha. Segundo Chaves et al. (1991), em casos de estresse leve a moderado, o fechamento estomático pode ser o indicador mais sensível do estresse que a perda no turgor.

Em condições mais severas de estresse hídrico, a redução da fotossíntese pode ser mais controlada pela eficiência dos cloroplastos em fixar CO₂ do que pelo aumento da resistência à difusão (YORDANOV et al., 2003). Nesses casos, a taxa fotossintética é reduzida predominantemente por limitações ditas não estomáticas ou metabólicas (GALMÉS et al., 2011), tais como a inibição da divisão celular e síntese de proteínas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Existe grande variabilidade no que diz respeito à tolerância ao déficit hídrico entre as espécies e, mesmo dentro de uma mesma espécie, entre variedades. Além disso, o estágio fenológico em que ocorre o estresse é crítico para a produtividade agrícola (MACHADO et al., 2009). Em plantas de milho, submetidas à seca, em diferentes fases de desenvolvimento, ocorre redução de mais de 60% na taxa fotossintética se a falta de água ocorrer na fase de pendoamento (ATTEYA, 2003).

A velocidade de imposição do estresse hídrico às plantas é importante no que diz respeito aos seus efeitos no metabolismo vegetal. Quando ocorre rapidamente, os mecanismos morfofisiológicos são severamente afetados. Entretanto, quando o déficit hídrico é estabelecido gradualmente, ocorrem adaptações na planta, principalmente se ocorrer no início do ciclo. Redução no crescimento, diminuição no tamanho das folhas e senescência foliar são algumas das respostas das plantas que lhes conferem adaptação a essa condição, uma vez que são mecanismos que diminuem a perda de água para atmosfera (CHAVES et al., 2009; CHAVES, 1991).

Nessas condições, mecanismos fisiológicos, como o ajuste osmótico, constituem uma estratégia adaptativa do vegetal aos múltiplos efeitos causados pelo estresse hídrico (CARLIN; SANTOS, 2009; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Neste mecanismo, há acúmulo de solutos nas células que mantêm alta pressão de turgor e permitem a continuidade da expansão celular, apesar do declínio causado no potencial de água na folha, além de preservar a integridade celular de proteínas, enzimas e membranas (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Parte das mudanças observadas na fotossíntese, em condições de estresse hídrico, pode ser atribuída aos efeitos secundários resultantes da superposição de outros estresses ambientais, dos quais a deficiência nutricional é frequente em regiões sujeitas à falta d'água, uma vez que o déficit hídrico afeta a absorção e assimilação de nutrientes, sendo que a última, por sua vez, afeta a fotossíntese (PIMENTEL, 2004).

3.3. Efeitos do estresse hídrico na cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar tem um metabolismo para fixação do CO₂ do tipo C₄, o que a permite ser adaptada à produção de biomassa em regiões tropicais, uma vez que as plantas possuem um controle estomático que possibilita maior economia de água e nitrogênio, recursos limitantes da produtividade das culturas nessas regiões.

Entretanto, para que a cultura expresse seu máximo potencial produtivo, depende de condições ambientais favoráveis, dentre as quais, destaca-se a disponibilidade de água durante o ciclo (ENDRES et al., 2010). Nas diversas regiões do mundo onde a cana-de-açúcar é cultivada,

principalmente nos trópicos, este é o fator que mais limita a produtividade, sobretudo onde o cultivo não é irrigado (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Nessas condições, períodos de déficit hídrico podem ocorrer durante todo o ciclo, mas seus efeitos sobre a produtividade variam em função da fase do ciclo fenológico da cultura, características varietais e intensidade do estresse (SILVA et al., 2008b; INMAN-BAMBER; JAGER, 1986).

Durante seu crescimento, a cana-de-açúcar passa por quatro estágios fenológicos distintos, denominados germinação, perfilhamento, intenso crescimento e maturação (VAN DILLEWIJN, 1952 apud RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000). A fase de perfilhamento, juntamente com a de intenso crescimento, conhecida como a fase de formação, tem sido identificada como a mais crítica no que diz respeito à demanda hídrica (MACHADO et al., 2009; RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Isso ocorre, principalmente, porque nessa fase são produzidos 70-80% de toda a biomassa acumulada durante o ciclo da cultura (OLIVEIRA et al., 2010; ALMEIDA et al., 2008). Inman-Bamber (2004) relatou reduções na fitomassa da planta, da ordem de 35%, após a ocorrência de estresse nessa fase.

Os efeitos da deficiência hídrica, durante o período de formação, foram citados por Zhao et al. (2010), que observaram reduções na condutância estomática, taxa de fotossíntese, número e tamanho dos perfilhos e acúmulo de biomassa. Decréscimos na condutância estomática, transpiração e assimilação de CO₂ também foram constatados por Machado et al. (2009) na fase de máximo crescimento. Gonçalves et al. (2010), avaliando a influência do estresse hídrico nas trocas gasosas da cana-de-açúcar durante a fase inicial de crescimento vegetativo, observaram que a taxa de assimilação líquida de CO₂ foi fortemente afetada. Endres et al. (2010) afirmam que a redução das trocas gasosas na cana-de-açúcar é influenciada, principalmente, pela diminuição da condutância estomática.

Dentre os processos afetados pelo déficit hídrico, o crescimento foliar da cana-de-açúcar é um dos mais sensíveis. Este processo é altamente dependente das relações de água na planta, de forma que já são observadas reduções da expansão foliar sob valores de potencial de água na folha abaixo de -0,2 MPa e praticamente não ocorre o crescimento quando os valores alcançam -0,7 MPa (INMAN-BAMBER; JAGER, 1986).

Reduções no crescimento foliar foram observadas por Smit & Singels (2006), em condições de estresse hídrico, o que segundo os autores também promoveu aceleração da senescência das folhas velhas, causando diminuição significativa no Índice de Área Foliar (IAF). Ramesh & Mahadevaswamy (2000) relatam a redução no aparecimento de folhas verdes e aumento da senescência foliar, após um período de 40 dias de estresse, o que resultou em decréscimo do IAF de 6 para 2. Zhao et al. (2010) verificaram reduções de até 59% no IAF, devido a ocorrência de estresse hídrico em plantas de cana-de-açúcar, e ainda decréscimo de cerca de 69% na biomassa de folhas verdes e aumento de 137% na biomassa de folhas mortas.

Algumas variedades de cana-de-açúcar, sob condições de estresse hídrico, enrolam as folhas para diminuir a superfície transpirante, que juntamente com a senescência foliar e redução na taxa de aparecimento foliar contribuem para redução do uso da água, e são considerados mecanismos de defesa da planta (MACHADO et al., 2009).

À medida que a água torna-se limitante, reduções no aparecimento de novos perfilhos também são observadas. Zhao et al. (2010) relatam diminuição na formação de perfilhos da ordem de 33 e 37% em dois anos consecutivos, decorrentes da imposição do estresse hídrico. Smit & Singels (2006) constataram decréscimo de 8,05 e 4,44 brotos por m², aos 40 dias após imposição do estresse, em cultivares consideradas suscetíveis e tolerantes à seca, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2008a), que observaram o efeito negativo do estresse hídrico no perfilhamento de variedades de cana-de-açúcar. Segundo Silva et al. (2008b), a habilidade de perfilhamento nesta fase e a subsequente eficiência no crescimento determinam o rendimento de uma cultivar e são características favoráveis que podem ser utilizadas na seleção de genótipos tolerantes à deficiência hídrica.

Associada à produção da cana-de-açúcar, tem-se que a dinâmica de crescimento dos colmos é outra variável que apresenta correlação positiva com o rendimento final da cultura, sendo significativamente afetada em condições de seca (SILVA et al., 2008b; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; RAMESH; MAHADEVASWAMY, 2000).

Nessas condições, Zhao et al. (2010) observaram redução no crescimento do caule e no número de nós, respectivamente da ordem de 15 e

25% no ano de 2009, e respectivamente 76 e 52% no ano de 2010, além de reduções de 53% na biomassa do caule no ano de 2009. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2008b) em plantas de cana-de-açúcar submetidas a estresse hídrico moderado, cujo peso seco dos caules foi em média 1,03 Kg em comparação com o tratamento sem estresse que foi de 1,13Kg.

Silva et al. (2008b) verificaram que tanto o tamanho como o peso dos colmos apresentam correlações positivas com a produtividade, que foi afetada pelo regime hídrico, cujas respostas foram variáveis em função do genótipo. Entretanto, os autores não observaram correlações da produtividade com o diâmetro do colmo em condições de déficit hídrico moderado, afirmando que, nessas condições, foram observados elevados valores de diâmetros, porém a produtividade foi reduzida devido ao menor tamanho dos colmos.

Quando submetida à falta de água, os fotoassimilados, que seriam requeridos para expansão foliar e do caule em condições adequadas de disponibilidade de água, são desviados para serem armazenados no caule. Assim, se esse estresse ocorre na fase de maturação, o rendimento de sacarose é aumentado. Esse fenômeno tem sido explorado por alguns produtores, que frequentemente submetem a cana-de-açúcar a estresse hídrico nessa fase, na tentativa de aumentar o conteúdo de sacarose no caule após a fase de formação (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

3.4. Análise de crescimento

O crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar, além de ser influenciado pelas condições meteorológicas do ambiente de cultivo e pelo manejo, sofrem também a ação de características da própria planta, como partição de matéria seca e estrutura do dossel.

Devido à complexidade da interação entre os diversos fatores que condicionam a produção vegetal, a análise de crescimento é uma ferramenta importante para auxiliar o pesquisador na identificação de diferenças de crescimento entre espécies e mesmo entre cultivares. Esta técnica permite identificar diferenças morfológicas e quantificar a produção líquida resultante do processo fotossintético, além de facilitar a compreensão das interações

ambiente-planta e a identificação dos cultivares apropriados ao cultivo em condições ambientais particulares (BENINCASA, 1988).

Fundamentada na medida sequencial do acúmulo de biomassa e de variáveis agronômicas e biofísicas, tais como produção de matéria seca e verde, medidas de dimensões lineares como a altura da planta, comprimento e largura de unidades estruturais morfológicas ou anatômicas, número de unidades estruturais e índice de área foliar, esta análise possibilita o cálculo de alguns índices, tais como: taxa de crescimento da cultura, taxa de crescimento relativo e taxa de assimilação líquida, o que possibilita, assim, a geração da curva de crescimento da cultura ao longo do ciclo (GAVA et al., 2001; SILVA et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2010; SINCLAIR et al., 2004).

Trabalhos, visando compreender os padrões de crescimento das plantas, mostram que o acúmulo de matéria seca na parte aérea ao longo do ciclo pode ser representado por uma curva com formato sigmóide, onde se distingue uma fase inicial de crescimento lento, passando posteriormente a uma fase exponencial, seguida por a uma fase de crescimento linear e, por fim, um novo período de crescimento lento, com a paralisação eventual do processo (ROBERTSON et al., 1996; GAVA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2010).

Este padrão de crescimento da cana-de-açúcar foi relatado por Oliveira et al. (2010). Os autores obtiveram ajuste sigmoidal para o acúmulo de matéria seca, que foi dividido em três fases. Na primeira, até 120 dias após o plantio (DAP), o acúmulo médio foi de 8 Mg ha^{-1} ; na segunda fase, dos 120 aos 300 DAP, ocorreram as maiores taxas de acúmulo de matéria seca no colmo, com valores médios que chegaram a 48 Mg ha^{-1} (83% da matéria seca total); na terceira fase, o acúmulo de matéria seca no colmo foi pequeno, com valores finais que variaram de 62 a 85 Mg ha^{-1} , dependendo da variedade.

Almeida et al. (2008) estudaram o desenvolvimento da cana-de-açúcar em função da temperatura do ar para o estado de Alagoas e verificaram que a variação do IAF apresentou três fases. Na primeira fase, até 750 graus-dias acumulados (GD) na cana planta, o crescimento foi lento em função da pequena área foliar por planta. Na segunda fase, ocorrida entre os 750 e 1500 GD, houve aumento rápido e linear do IAF com valores de 3,5 e, na terceira fase, entre 1500 e 2015 GD, ocorreu estabilização do IAF.

Silva et al. (2012), estudando a variedade RB92579, constataram três períodos distintos para o perfilhamento. O primeiro, observado até os 96 DAP, foi caracterizado por um elevado perfilhamento, com taxas que variaram entre 0,250 e 0,147 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. No segundo período (96 e 154), verificou-se a redução na taxa de perfilhamento de 0,147 para 0,056 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$. Neste período, notou-se diminuição de 42,5 para 19,6 perfilhos m^{-2} . No terceiro período, foram observadas taxas de perfilhamento com variação de 0,0063 a 0,003 perfilhos $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$.

Santos et al. (2009) ressaltam a importância da análise de crescimento ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, uma vez que essa ferramenta permite a avaliação do acúmulo sequencial de matéria seca nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura. Segundo Oliveira et al. (2011b), a determinação do comprimento das fases para cada variedade é importante para que, nos períodos de maior exigência hídrica, o suprimento nutricional seja adequado.

Nesses estudos, frequentemente são utilizados modelos de crescimento, onde, por meio de funções matemáticas, é possível realizar uma síntese dos mecanismos físicos e bioquímicos entre a planta e o ambiente. Ainda, segundo sua forma de abordagem, podem ser classificados como: a) empíricos, isto é, são apenas uma descrição dos dados experimentais; e b) mecanísticos, onde todo o processo a ser modelado baseia-se em pressuposições físicas ou fisiológicas (MONTEITH, 1996 apud PEREIRA, 2002).

Modelos matemáticos simples, como as funções de Gompertz, Richards e logística, são exemplos de modelos empíricos e, frequentemente, são usados para simular a dinâmica do crescimento, altura da planta e acúmulo de biomassa (LYRA et al., 2008). Na cultura da cana-de-açúcar, exemplos da utilização de tais modelos incluem estudos da relação de doses de fertilizantes e acúmulo de fitomassa (GAVA et al., 2001; SANTOS et al., 2009); do desempenho produtivo de cultivares em condições ambientais particulares (OLIVEIRA et al., 2005; SILVA et al., 2012) e da eficiência do uso da água de cultivares (OLIVEIRA et al., 2010).

Outro modelo de grande utilidade é a função expolinear de Goudriaan & Monteith (1990), que pode ser considerado como semi-empírico. O princípio geral desse modelo consiste em considerar que qualquer cultura tem duas

fases distintas, onde na primeira, as plantas são jovens e estão isoladas, sendo o seu crescimento exponencial, com uma taxa de crescimento relativo constante. A segunda fase consiste de um período de crescimento linear, verificado quando a interceptação máxima de radiação fotossinteticamente ativa é alcançada. A grande vantagem desses modelos é que seus coeficientes apresentam, na sua maioria, significado biológico, o que permite inferir sobre alterações do ambiente, práticas agrícolas, épocas de plantio, entre outros fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das culturas. Portanto, o ajuste desses modelos subsidia informações para a tomada de decisão do manejo mais apropriado, de acordo com as condições edafoclimáticas (LYRA et al., 2003).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados dois experimentos com a cultura da cana-de-açúcar. O primeiro foi conduzido sob condições de campo, cujo objetivo foi ajustar modelos de crescimento não lineares ao acúmulo de massa seca de quatro cultivares de cana-de-açúcar. O segundo foi conduzido em casa-de-vegetação, onde se avaliou os índices morfofisiológicos dos mesmos cultivares sob diferentes condições controladas de estresse hídrico.

4.1. Cultivares

Utilizaram-se quatro cultivares RB de cana disponibilizadas pela Rede Interinstitucional para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA), sendo eles: RB867515, RB92579, RB855453 e RB928064. Segundo dados do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA), os cultivares RB ocupam hoje por volta de 58% de toda área plantada com cana no Brasil. Dentre esses cultivares, o RB867515 lidera o *ranking* dos mais plantados, ocupando aproximadamente 22% da área de plantio das principais zonas produtoras da região centro-sul. Este cultivar é considerado tolerante às condições de seca, além de possuir elevado teor de sacarose e apresentar rápido crescimento e elevada produtividade (PMGCA, 2012).

O cultivo do RB92579 se sobressai na região nordeste do País, onde, segundo levantamento feito pela Ridesa sobre a utilização de cultivares protegidos no ciclo de 2009/2010, ocupa 28% da área de cultivo. Dentre outras características agronômicas favoráveis ao seu cultivo, estudos indicam relativa tolerância à seca e elevada eficiência no uso da água (BARBOSA et al., 2003; COSTA et al., 2011, OLIVEIRA et al., 2011).

O RB855453 é o cultivar precoce mais plantado no centro-sul e caracteriza-se por apresentar boa produção nas soqueiras, sendo porém

exigente às condições ambientais adequadas (PMGCA, 2012). No que diz respeito à exigência de água para produção, Matsuoka et al. (1995) afirmam ser medianamente exigente.

O cultivar RB928064 é recomendado para o plantio em solos mais férteis e com boa retenção de umidade, apresentando, nessas condições, bom desempenho (BARBOSA et al., 2004).

4.2. Cultivo em condições de campo

4.2.1. Aspectos gerais

O plantio em campo foi realizado no dia 26 de outubro de 2011, na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa (DFT/UFV) (20° 45' 45" S, 42° 52' 04" W e altitude de 690 m) (Figura 1). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwa (Clima temperado quente – mesotérmico; chuvas no verão e seca no inverno; temperatura média no mês mais quente superior a 22°C).

A caracterização química e física do solo foi realizada a partir de amostras coletadas nas camadas de 0-20 cm (Tabelas 1 e 2). O preparo do solo consistiu de duas gradagens, seguidas de abertura dos sulcos de plantio. A adubação e calagem foram feitas com base na análise físico-química do solo (Tabelas 1 e 2), seguindo as recomendações de Korndörfer et al. (1999) e Alvarez V. et al. (1999), respectivamente. Para a correção do solo, utilizou-se calcário dolomítico na dose de 1000 kg ha⁻¹ (PRNT = 96%). Na adubação de plantio, foram aplicados no fundo do sulco 45 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 45 Kg ha⁻¹ de K₂O. Aos 60 dias após o plantio (DAP), foi feita adubação de cobertura, tendo-se aplicado 45 kg ha⁻¹ de N e 45 Kg ha⁻¹ de K₂O



Figura 1 - Vista geral do experimento em condições de campo.

O sistema de plantio adotado foi o manual, onde utilizaram-se quatro cultivares: RB92579, RB867515, RB928064 e RB855453. As colmos foram distribuídos de forma contínua nos sulcos, que tinham 30 cm de profundidade. Ao longo do sulco, foram dispostos dois colmos paralelamente na posição pé com ponta e, posteriormente, cortados em toletes com 3 a 4 gemas, perfazendo o total de 18 gemas/m. Em seguida, os toletes foram cobertos com uma camada de 5 a 10 cm de solo. As parcelas foram compostas por 7 linhas de 30 metros, espaçadas entre si em 1,40m.

Ao longo do período experimental, foram realizados dois eventos de irrigação, onde aplicou-se uma lâmina de 35 mm em cada evento, por meio de um sistema de aspersão convencional.

Para o controle de plantas espontâneas, foram realizadas duas capinas manuais e uma química, onde utilizou-se um herbicida específico. Durante o período experimental, não foi verificada infestação de pragas ou doenças, portanto, não houve a necessidade da utilização de defensivos para essa finalidade.

4.2.2. Caracterização físico-química do solo

Para a caracterização físico-química do solo da área experimental (Tabelas 1 e 2), foram coletadas amostras deformadas do solo, na camada de 0-20 cm de profundidade, as quais foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solo da Universidade Federal de Viçosa.

Tabela 1 - Análise física do solo

Areia grossa (%)	Areia fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe Textural*
20	11	17	52	Argila

* Análise realizada pelo laboratório de Física do Solo da UFV, para amostragem da camada de 0-20 cm.

Tabela 2 - Análise química do solo

Características químicas	Unidades	Resultados*	Interpretação**
pH em água (1:2,5)	-	5,39	Baixo
Fósforo disponível (P)	mg dm ⁻³	5,00	Baixo
Potássio disponível (K)	mg dm ⁻³	50,00	Médio
Cálcio trocável (Ca ²⁺)	cmol _c dm ⁻³	2,70	Bom
Magnésio trocável (Mg ²⁺)	cmol _c dm ⁻³	0,65	Médio
Acidez trocável (Al ³⁺)	cmol _c dm ⁻³	0,00	Muito baixo
Acidez potencial (H+Al)	cmol _c dm ⁻³	4,00	Médio
Soma de bases	cmol _c dm ⁻³	3,48	Médio
CTC efetiva	cmol _c dm ⁻³	3,48	Médio
CTC a pH 7	cmol _c dm ⁻³	7,48	Médio
Saturação por alumínio	%	0,00	Baixo
Saturação por bases	%	46,50	Médio
Matéria orgânica	dag kg ⁻¹	-	-

* Análise realizada pelo laboratório de Análise de Solo da UFV, para amostragem da camada de 0-20 cm.

** Interpretação segundo as recomendações para o estado de Minas Gerais, 5ª aproximação (RIBEIRO et al., 1999).

4.2.3. Dados da parte aérea da cana-de-açúcar

Para ajuste dos modelos de crescimento exponencial, logístico, e de Gompertz, foram obtidos dados da biomassa seca da parte aérea dos cultivares de cana-de-açúcar. Concomitantemente, realizou-se um monitoramento biométrico das plantas amostradas para ajuste de modelos de estimativa da área foliar, matéria seca das folhas e do colmo, visando estimativas dos mesmos cultivares no experimento conduzido em casa-de-vegetação.

4.2.3.1. Dados de Biomassa seca

Para obtenção dos dados de biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, foram realizadas amostragens, em intervalos de uma a duas semanas, a partir de 44 até 206 dias após o plantio, o que totalizou 17 avaliações (Tabela 3). Considerou-se 0,5 m iniciais da área de plantio como bordadura e, a partir daí, em cada avaliação foram amostradas cinco plantas representativas em 1 m linear desta área de plantio para cada cultivar (Figura 2).

Os perfilhos foram amostrados ao nível do solo e levados para o laboratório, onde foram divididos em folhas e colmos.

A matéria fresca das partes da planta foi obtida com auxílio de uma balança de precisão (Modelo MICRONAL B200, Micronal S.A., São Paulo, SP) com $\pm 0,001\text{g}$ de precisão. Depois da pesagem da massa fresca, as amostras foram identificadas e levadas para uma estufa com circulação de ar, onde permaneceram à temperatura de 70°C até atingirem peso constante. Em seguida, foram pesadas em balança de precisão, para quantificação da matéria seca das folhas e total do colmo, visando à obtenção da matéria seca total da parte aérea (folhas e colmos).

Tabela 3 – Número de avaliações, dias após o plantio (DAP) e data das amostragens realizadas no experimento em condições de campo, Viçosa-MG.

Nº da avaliação	DAP	Data
1 ^a	44	09/12/2011
2 ^a	51	16/12/2011
3 ^a	58	23/12/2011
4 ^a	65	30/12/2011
5 ^a	72	06/01/2012
6 ^a	79	13/01/2012
7 ^a	86	20/01/2012
8 ^a	93	27/01/2012
9 ^a	100	03/02/2012
10 ^a	107	10/02/2012
11 ^a	121	24/02/2012
12 ^a	135	09/03/2012
13 ^a	149	23/03/2012
14 ^a	162	05/04/2012
15 ^a	177	20/04/2012
16 ^a	191	04/05/2012
17 ^a	206	18/05/2012



Figura 2 - Detalhes da amostragem das plantas no cultivo de campo, Viçosa-MG.

4.2.3.2. Dados biométricos

O monitoramento biométrico foi executado nas mesmas plantas em que foram obtidos os dados de biomassa seca. Nessas avaliações, determinou-se o comprimento e a largura da cada folha com o auxílio de uma régua graduada (Figura 3b) e, em seguida, foi determinada a área da superfície vegetal de cada folha, utilizando-se um medidor de área foliar (Modelo LI-3100, LI-COR, Inc., Lincoln, NE) (Figura 3c). Os valores medidos da área de cada folha foram totalizados para a obtenção da área foliar das plantas amostradas.

Concomitantemente, foram obtidos os dados de altura do colmo, mensurada com o auxílio de uma régua graduada da base da planta até a primeira aurícula visível, classificada como folha +1 (primeira folha superior completamente desenvolvida com a lígula visível), e diâmetro do colmo, obtido na base da planta com o auxílio de um paquímetro (Figura 3a).

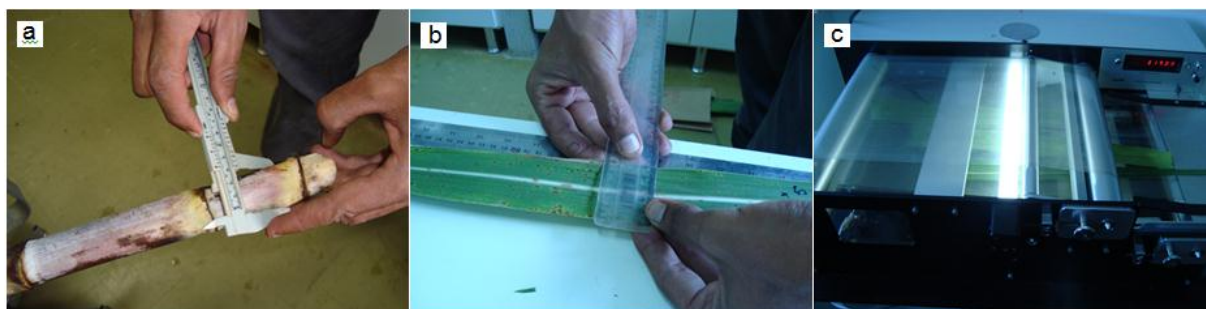


Figura 3 - Detalhes das medidas biométricas realizadas em laboratório: diâmetro do colmo (a), comprimento e largura foliar (b) e área foliar (c).

4.2.4. Medição dos elementos meteorológicos e sistema de aquisição de dados

Os dados meteorológicos foram medidos a partir de sensores instalados em um mastro localizado próximo da área de cultivo, onde foram monitorados os dados de temperatura e umidade relativa do ar (modelo HMP60, Vaisala, Woburn, MA, USA), radiação solar global (modelo LI-200SA, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) e radiação fotossinteticamente ativa (modelo LI-190SA, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA). As medidas foram realizadas com auxílio de um sistema de aquisição de dados automático. Os dados de precipitação e vento foram obtidos da estação meteorológica no INMET localizada em Viçosa.

O sistema de aquisição de dados foi composto de dois módulos analógicos (modelo LR-7018, LR Informática Industrial, Porto Alegre, RS) de interface RS-485 e um módulo conversor (modelo LR-7520, LR Informática Industrial, Porto Alegre, RS) que permite a conversão da interface RS-485 a dois fios para RS-232.

Para aquisição e armazenagem de dados no microcomputador, foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C++ Builder (Figura 8). Os dados ambientais medidos foram armazenados em intervalos de um minuto, totalizando 1440 medições por dia (Apêndice).

4.2.5. Ajuste e avaliação do desempenho de modelos de crescimento

Os modelos utilizados foram o expolinear, logístico e Gompertz, os quais foram ajustados de acordo com as variáveis independentes, sendo dias após o plantio (DAP) e graus-dia acumulados (GD). As análises de regressão foram realizadas com base na aplicação dos logaritmos aos modelos propostos, conforme sugerido por Lyra et al. (2003):

expolinear:

$$\ln(w) = \ln(c_m / r) + \ln \left\{ \ln \left[1 + \exp(r(x - t_b)) \right] \right\} \quad (1)$$

logístico:

$$\ln(w) = \ln(w_f) - \ln \left[1 + (w_f / w_0 - 1) \exp(-r x) \right] \quad (2)$$

Gompertz:

$$\ln(w) = \ln(w_0) + r \left[1 - \exp(-r_d x) \right] / r_d \quad (3)$$

em que:

x – GD ou DAP acumulados após o plantio, d ou °Cd

w₀ - matéria seca inicial da parte aérea, g planta⁻²

w_f - matéria seca final da parte aérea, g planta⁻²

r - taxa máxima de crescimento relativo, g g⁻¹ d⁻¹ ou g g⁻¹ °Cd⁻¹

c_m - taxa máxima de crescimento absoluto, g planta⁻² d⁻¹ ou g planta⁻² °Cd⁻¹

r_d - parâmetro que define o decréscimo da taxa de crescimento relativo, adimensional

t_b - tempo perdido ou tempo necessário para o fechamento do dossel, d ou °Cd.

A significância dos parâmetros foi avaliada pelo teste t, enquanto os modelos foram avaliados pelo teste F, ambos ao nível de 5% de probabilidade.

4.2.5.1. Graus-Dia acumulados

Na estimativa dos graus-dia acumulados (GD, °C d⁻¹), foram utilizados os dados de temperatura média diária do ar, sendo utilizada a Equação 4 e considerando-se a temperatura base da cultura igual a 10°C para a parte aérea total da planta e 16°C para os colmos, como sugerido por Smit & Singels (2006).

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_m - T_b) \quad (4)$$

em que:

T_m - temperatura do ar média diária (°C)

T_b - temperatura base da cultura (°C).

4.3. Cultivo em casa-de-vegetação

4.3.1. Aspectos gerais

O experimento foi conduzido em uma casa-de-vegetação não climatizada, localizada na área experimental do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG. As coordenadas geográficas são: latitude 20°45'45" S, longitude 42°52'04" e altitude 690 m. O clima da área de estudo é do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Köppen (clima temperado quente-mesotérmico com chuvas no verão e seca no inverno, apresentando temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C).

A casa-de-vegetação era do tipo cobertura em arco, com maior dimensão orientada no sentido Leste-Oeste. O plástico de cobertura era constituído de filme de polietileno de baixa densidade (PEBD), com espessura de 150 µm, com aditivos contra a ação de raios ultravioleta. As laterais foram revestidas com tela plástica de cor branca. A casa-de-vegetação apresentava características modulares e pré-fabricadas, com 15,0 m de comprimento, 7,0 m

de largura e altura central de 3,5 m, o que totalizava uma área de superfície correspondente a 105 m², coberta por uma camada de brita (Figura 4).

4.3.2. Plantio e condução do experimento em casa-de-vegetação

No dia 17/12/2011, os toletes dos quatro cultivares citados anteriormente, obtidos de plantas saudáveis, foram plantados em vasos de plástico com capacidade individual para 10 litros. Os vasos foram preenchidos com substrato comercial (Bioplant, Ponte Nova, MG) à base de casca de Pinus, agentes agregantes, vermiculita, fibra de coco e complementos minerais (NPK e micronutrientes). Dois toletes foram colocados em cada vaso para reduzir possíveis falhas de germinação. Após a emergência, realizou-se um desbaste para que apenas uma planta fosse mantida em cada vaso. Nessa etapa, buscou-se eliminar as plantas cujo desenvolvimento se diferia das demais, visando à obtenção de um padrão homogêneo de crescimento (Figura 4).

Em decorrência da uniformidade das condições de cultivo, o experimento foi conduzido conforme o delineamento inteiramente casualizado, com 16 tratamentos e cinco repetições, totalizando, assim, 80 unidades experimentais. Como cada unidade experimental era constituída de uma única planta, das 192 plantas cultivadas, apenas 80 foram avaliadas.

Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 4 x 4 (quatro cultivares e quatro níveis de estresse). Os quatro cultivares (RB92579, RB867515, RB928064 e RB855453) foram submetidos a períodos alternados de estresse hídrico e de reposição de água no substrato, cujos limites de tensão foram compreendidos entre a capacidade de campo e os níveis de 10 (ausência de estresse), 60 (leve), 90 (moderado) e 120 kPa (severo).

Durante o período experimental, foram realizadas fertirrigações periódicas para o fornecimento complementar de nutrientes para as plantas. A solução nutritiva foi preparada manualmente em um tanque, onde foi utilizado um fertilizante comercial denominado "*Peters Professional*" (Peters Professional 20-20-20 GP, Marysville, OH, USA). Este fertilizante possuía a seguinte composição: 20% de N, 20% de P₂O₅, 20% de K₂O, 0,05% de Mg, 0,0068% de B, 0,0036% de Cu, 0,05% de Fe, 0,025% de Mn, 0,0009% de Mo, 0,0025% de Zn.



Figura 4 - Vista geral do cultivo da cana-de-açúcar em vasos nas condições de casa-de-vegetação.

No fundo de cada vaso foi feito um orifício circular, onde foi colocado um disco de tela plástica com malha de 1 mm e acima deste, 500 ml de carvão vegetal. Este procedimento foi adotado para facilitar a drenagem do excesso de água através do substrato, proveniente das fertirrigações.

Um perfil hidropônico de polipropileno (Hidrogood, Taboão da Serra, SP) com 2,6 m de comprimento foi mantido a uma inclinação de 4% para coleta da solução nutritiva drenada em cada fileira. Na extremidade mais baixa do perfil, foram instalados drenos que estavam conectados a um vaso de 4 litros, onde foi armazenada a solução excedente após a realização de cada evento de fertirrigação. As extremidades do perfil foram vedadas com uma peça de borracha, específica para essa finalidade. Cada perfil coletou a drenagem proveniente de seis vasos de cultivo, sendo então utilizado um total de 32 perfis de coleta para os 192 vasos cultivados com cana-de-açúcar (Figura 5). Durante o período de crescimento, os perfilhos foram removidos periodicamente, de forma a manter apenas uma planta em cada vaso.



Figura 5 - Vista geral do sistema de drenagem. Perfil hidropônico (a) e vasos para armazenamento do excedente da fertirrigação (b).

As plantas foram fertirrigadas por meio de microtubos flexíveis derivados de tubulações de PVC. A duração e a frequência dos eventos de fertirrigação foram determinadas por um microcomputador, que realizou o cálculo da necessidade de irrigação com base no sinal elétrico de um sensor de tensão de água instalado no substrato de cultivo. As plantas foram tutoradas individualmente, para garantir o crescimento vertical e evitar o tombamento causado pelo próprio peso.

A condutividade elétrica (CE) da solução percolada nos vasos foi monitorada por meio de um condutímetro (modelo CDH-42, Omega, Stamford, CT, USA) e foi mantida entre 2,0 e 3,0 dS m⁻¹.

4.3.2. Avaliações biométricas e estimativa da biomassa seca da cana-de-açúcar

Em função do limitado número de plantas no interior da casa-de-vegetação, não foram realizadas amostragens destrutivas, procedendo-se apenas amostragens biométricas.

O monitoramento biométrico das plantas na casa-de-vegetação teve início no dia 17/01/2012 (30 DAP) e término no dia 22/05/2012 (157 DAP). As avaliações foram realizadas semanalmente, totalizando 19 amostragens ao longo do período experimental.

Foram selecionadas aleatoriamente cinco plantas de cada tratamento, nas quais mediram-se a estatura média dos colmos, com o auxílio de uma régua graduada, da superfície do substrato até a folha +1, o diâmetro médio dos colmos, obtido na base da planta com o auxílio de um paquímetro, e o comprimento e largura de cada folha da planta, também com uma régua graduada.

A área foliar das plantas foi estimada por meio da equação proposta por Francis et al., (1969):

$$AF = \sum_{NF} (C * L * f) \quad (5)$$

em que:

AF - área foliar estimada de cada planta amostrada, cm²

NF - número de folhas presentes na planta

C - comprimento de cada folha, cm

L - largura de cada folha, cm

f - fator de forma, adimensional.

O fator de forma, citado na equação acima, foi obtido pela relação entre o comprimento e largura de cada folha, medidos em campo, e suas respectivas áreas. O coeficiente angular da regressão entre o produto de C e L e a área foliar medida determinou o fator de forma. Os valores obtidos foram 0,60, 0,62, 0,65 e 0,64 para os cultivares RB92579, RB867515, RB928064 e RB855453, respectivamente.

A massa seca das folhas foi obtida pela Equação 6:

$$MSF = a + AF * b \quad (6)$$

em que:

MSF - massa seca das folhas, g planta⁻¹

a e b - parâmetros da equação, adimensionais.

Os parâmetros a e b foram ajustados para cada cultivar, por meio da relação entre área e massa seca foliar, medidas nas plantas do experimento de campo.

Similarmente, foi estimada a massa seca dos colmos, utilizando-se a Equação 7:

$$MSC = \alpha * D + \beta * AP \quad (7)$$

em que:

MSC - massa seca dos colmos, g planta⁻¹

D - diâmetro do colmo, cm

AP - altura do colmo, cm

α e β - parâmetros da equação.

Os parâmetros α e β foram obtidos para cada cultivar, por meio da relação do diâmetro e altura do colmo com sua respectiva massa seca, medidos nas plantas do experimento de campo.

A massa seca da parte aérea foi obtida pela soma dos valores estimados de massa seca das folhas e massa seca do colmo.

4.3.3. Índices morfofisiológicos

Os dados estimados de massa seca da parte aérea e os medidos de estatura do colmo foram submetidos à análise de regressão não-linear, tendo como variável independente graus-dia acumulados após o plantio, obtendo-se ajuste do modelo sigmoidal com três parâmetros (Equação 8).

$$f = \frac{a}{\left(1 + \exp\left(-\frac{(x - x_0)}{b}\right)\right)} \quad (8)$$

em que:

f - massa seca da parte aérea, g planta⁻¹; ou altura do colmo, cm

x - graus-dia acumulados após o plantio, °Cd

a, b e x₀ - parâmetros do modelo.

Os índices morfofisiológicos, denominados como taxa de crescimento absoluto da cultura (TCC, g °Cd⁻¹) e taxa de alongação do colmo (TEC, cm °Cd⁻¹), foram obtidos pela derivação do modelo sigmoidal com três parâmetros, como sugerido por Silva et al. (2009) (Equação 9). A taxa de crescimento relativo da cultura (TCR, g g⁻¹ °Cd⁻¹) e a taxa de alongação relativa do colmo (TCH, cm cm⁻¹ °Cd⁻¹) foram obtidas, respectivamente, a partir da solução analítica da relação entre TCC e a massa seca da planta (TCR=TCC/MSP) e TEC e altura da planta (TCH=TEC/AP) (Equação 10).

A TCC expressa a variação de matéria seca em um intervalo de tempo específico, dando uma indicação do acúmulo de massa absoluto. Por outro lado, a TCR reflete o aumento da massa seca da planta por unidade de massa atual, em um intervalo de tempo. A TEC representa o incremento na estatura do colmo em um intervalo de tempo e a TCH o incremento na estatura do colmo em um intervalo de tempo a partir do seu tamanho atual.

$$\text{TCC} / \text{TEC} = \frac{a \exp\left(-\frac{(x - x_0)}{b}\right)}{b \left(1 + \exp\left(-\frac{(x - x_0)}{b}\right)\right)^2} \quad (9)$$

$$\text{TCR} / \text{TCH} = \frac{\exp\left(-\frac{(x - x_0)}{b}\right)}{b \left(1 + \exp\left(-\frac{(x - x_0)}{b}\right)\right)} \quad (10)$$

4.3.4. Avaliação da matéria seca da parte aérea

Ao final do experimento, realizou-se uma amostragem destrutiva, onde foram coletadas cinco plantas de cada tratamento. Após a medição da estatura dos colmos, as amostras foram identificadas e levadas para uma estufa com circulação de ar, onde permaneceram à temperatura de 70°C até atingirem peso constante. Em seguida, foram pesadas em balança de precisão para quantificação da matéria seca da parte aérea.

Os dados obtidos nesta amostragem foram avaliados estatisticamente por meio da análise de variância – ANOVA, sendo os efeitos individuais dos tratamentos obtidos pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

4.3.5. Monitoramento dos elementos meteorológicos e sistema de aquisição de dados

A temperatura e umidade relativa do ar foram medidas por meio de um sensor conjugado (modelo HMP60, Vaisala, Woburn, MA, USA), que foi instalado no interior de um tubo de PVC aspirado (Figura 6). O objetivo do abrigo foi 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). Para medida da radiação solar global, utilizou-se um piranômetro (modelo LI-200SA, Li-Cor, Lincoln, NE, USA). A radiação fotossinteticamente ativa foi medida por um sensor quântico (modelo LI-190SA, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA), e a velocidade do ar foi medida por um anemômetro de fio quente (modelo FMA-903-I, Omega, Stamford, CT, USA). O piranômetro e o anemômetro também foram instalados na torre de aspiração constituída de PVC.

Inicialmente, os sensores foram instalados a 2,0 m da superfície do solo e, posteriormente, deslocados verticalmente para cima à medida que ocorreu o crescimento da cultura, procurando sempre mantê-los acima do dossel vegetativo.

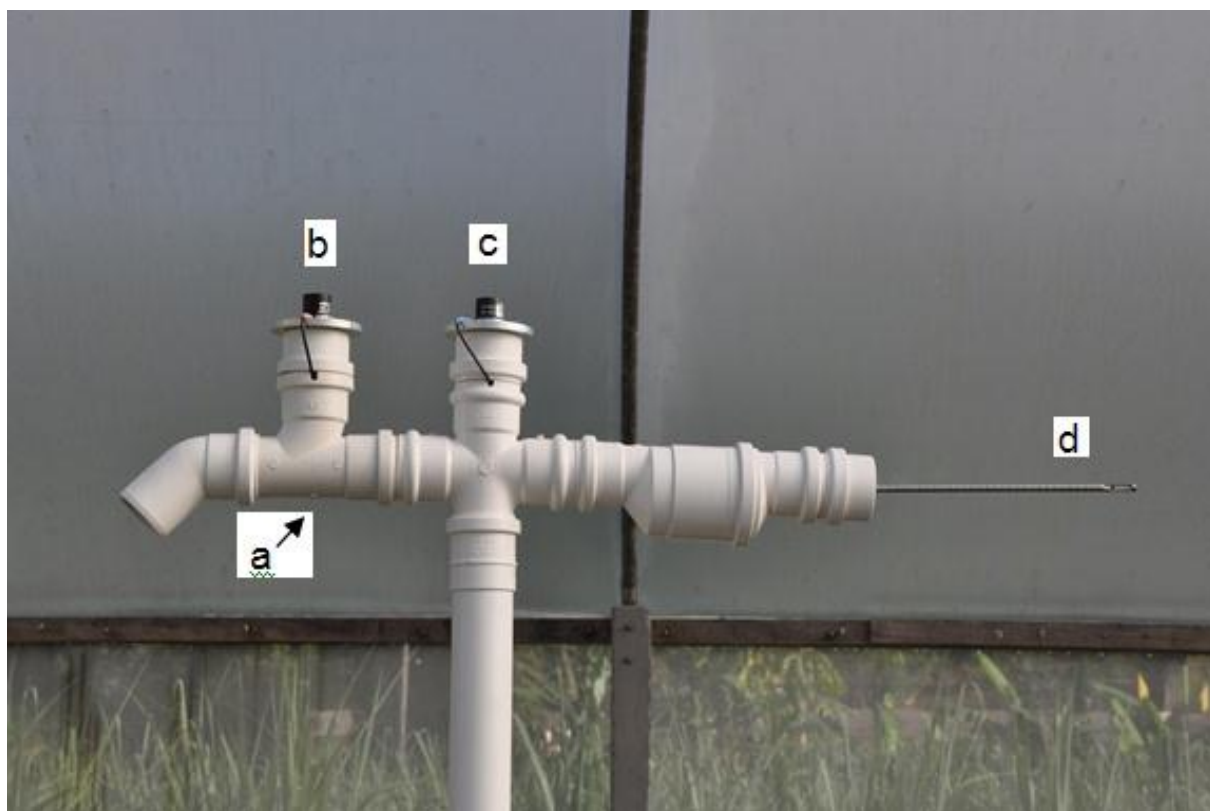


Figura 6 - Tubo de PVC aspirado contendo os sensores eletrônicos: a) temperatura e umidade relativa do ar; b) radiação fotossinteticamente ativa; c) radiação solar global e d) velocidade do ar.

Para medição da tensão de água no substrato, foram utilizados quatro sensores Watermark (200-SS, Irrrometer Company, Riverside, CA) instalados a uma profundidade de 20 cm (Figura 7). Este sensor baseia-se no método indireto para determinação instantânea da umidade do solo, por meio da medida da resistência à passagem de corrente elétrica no substrato (Equação 11). Paralelamente, a temperatura do substrato foi obtida por meio de termopares de cobre-constantan do tipo “T” e foi utilizada para a correção dos valores de resistência (Equação 12), necessários para a obtenção da tensão de água no substrato por meio da Equação 13.

$$R = \frac{5818,33 - f}{0,002313 * f + 0,003007} \quad (11)$$

$$R_{cor} = \frac{R}{1 - (0,0018 * (21 - t))} \cdot \frac{1}{1000} \quad (12)$$

$$T = \frac{4,093 + (3,213 * R_{cor})}{1 - (0,009733 * R_{cor}) - (0,01205 * t)} \quad (13)$$

em que:

f - frequência dos pulsos elétricos que passam pelos eletrodos do sensor, Hz

R – resistência, Ω

R_{cor} - resistência corrigida em função de t , $k\Omega$

t - temperatura do substrato, $^{\circ}C$

T - tensão de água no substrato, kPa



Figura 7 - Detalhe do sensor Watermark.

O monitoramento da tensão de água no substrato de cultivo e dos elementos meteorológicos no interior da casa-de-vegetação foi realizado por meio de um sistema computadorizado, onde foi desenvolvido um programa em linguagem C++ Builder (Figura 8), que, além de possibilitar a aquisição de dados, foi responsável pelo cálculo das necessidades hídricas e acionamento das motobombas de fertirrigação quando os níveis críticos de tensão no substrato eram alcançados (Apêndice).

O sistema de aquisição de dados foi composto por um módulo analógico (modelo LR-7018, LR Informática Industrial, Porto Alegre, RS). O acionamento das motobombas de fertirrigação foi realizado por relés que estavam conectados à porta paralela do microcomputador (Figura 9).

Os dados de cada elemento meteorológico foram armazenados em um microcomputador em períodos de 1 minuto, correspondentes à média de cinco medições realizadas em intervalos de 1 s no período compreendido entre 55 e 59 s. A duração dos eventos de fertirrigação também foi armazenada pelo sistema de aquisição de dados.



Figura 8 – Interface do programa de aquisição de dados e controle das motobombas de fertirrigação.

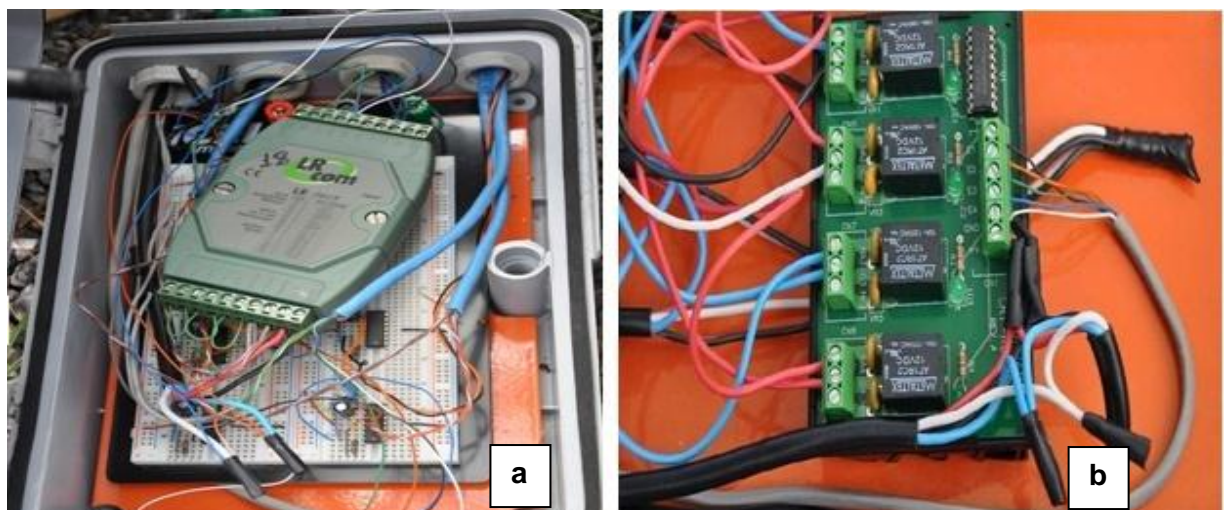


Figura 9 - Sistema de aquisição de dados (a) e controle das motobombas de fertirrigação (b).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Experimento em condições de campo

5.1.1. Elementos meteorológicos

Na Figura 10 são apresentados os valores observados, durante o período experimental, dos seguintes elementos meteorológicos: a) velocidade do ar (u) (10A); b) radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) (10B); c) precipitação e irrigação (10C) e d) temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}) (10D). No caso da radiação solar global, os valores apresentados referem-se à integração das medidas instantâneas ao longo do período diurno. Similarmente, os valores de precipitação e de irrigação correspondem aos totais diários, enquanto as demais variáveis referem-se às médias diárias observadas a partir de medidas realizadas em intervalos de 1 minuto.

Neste período, a temperatura do ar média diária foi de 21,2 °C, com valores extremos de 15,6 e 24,1 °C (Figura 10D). Esta amplitude caracterizou condições térmicas abaixo da faixa considerada ótima para a cana de açúcar que, segundo Rodrigues (1995), situam-se entre 25 e 35 °C. As maiores temperaturas ocorreram entre meados de janeiro a março, com valores médios de 22,4 °C, que contribuíram para que o DPV_{ar} atingisse valores de até 7,24 hPa (Figura 10B). Em contraste, os menores valores do DPV_{ar} foram observados nos meses de dezembro a janeiro, onde concentrou-se o maior número de eventos de chuvas.

Verificou-se que, a partir de abril, houve redução nos valores de R_g , devido à transição da estação do outono para o inverno, o que ocasionou diminuição nos valores de temperatura do ar. Os valores observado máximo e mínimo de R_g durante o período experimental foram respectivamente 27 MJ m⁻² d⁻¹ (11/11/2011) e 2,21 MJ m⁻² d⁻¹ (14/05/2012).

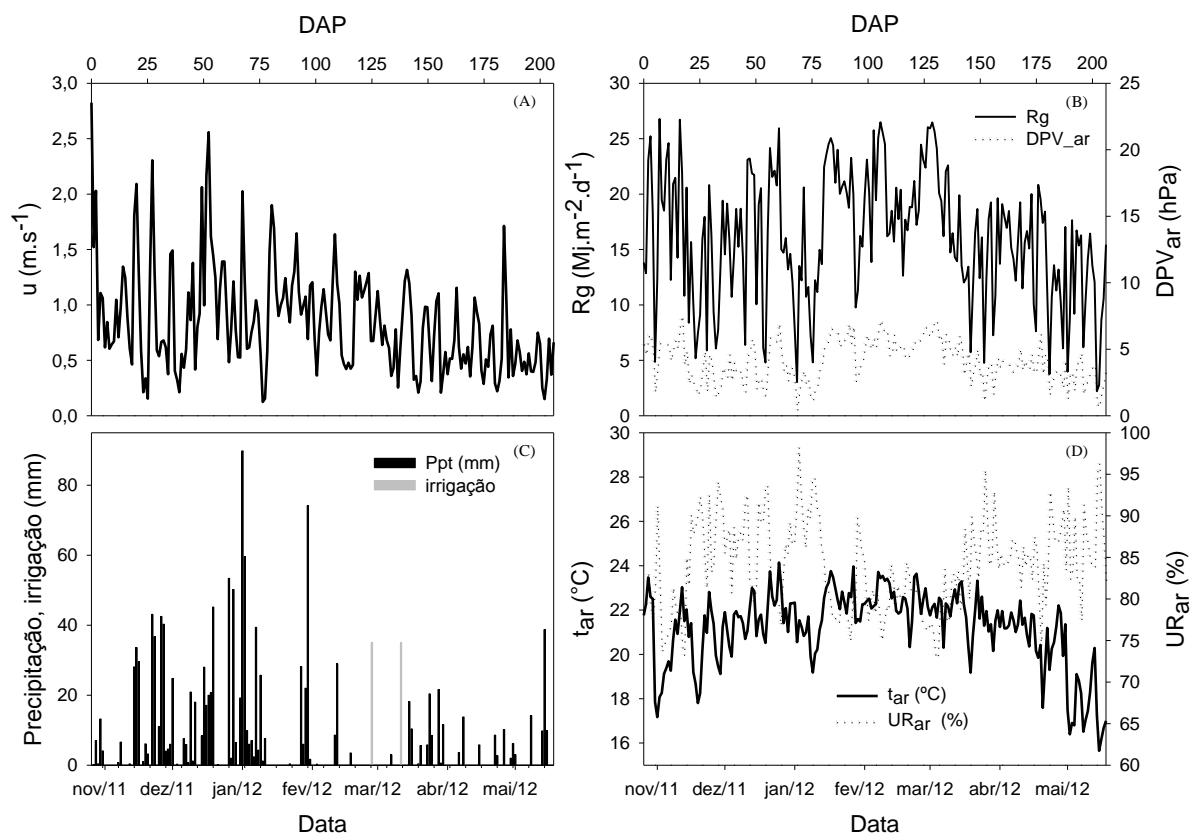


Figura 10 - Variação dos elementos meteorológicos ao longo do período de crescimento dos cultivares de cana-de-açúcar, no ciclo de cana-planta, na localidade de Viçosa-MG. As medidas referem-se aos totais diários de radiação solar global (R_g) e valores médios diários do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) (A); velocidade do ar (u) (B); temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}) (C). Adicionalmente, são apresentados os totais diários da precipitação e irrigação (D).

No que se refere à velocidade do ar, os maiores valores ocorreram nos primeiros meses do presente estudo, cujo valor máximo foi $2,83 \text{ m s}^{-1}$ (26/10/2011). Em contraste, o menor valor foi observado no dia 10/01/2012, sendo de $0,13 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 10A).

A precipitação pluvial totalizada ao longo do período experimental foi de 1.334 mm. O valor total diário máximo de chuva foi de 89,8 mm (01/01/2012). Para suprir a redução da precipitação no final de fevereiro e início do mês de março, um sistema de irrigação foi acionado nos dias 27/02 e 11/03 quando se aplicou uma lâmina de irrigação de 35 mm em cada dia (Figura 10C).

5.1.2. Ajuste dos modelos expolinear, logístico e Gompertz aos valores observados de matéria seca da parte aérea da cana-de-açúcar

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam os parâmetros obtidos pelo ajuste dos modelos expolinear (r , c_m e t_b), logístico (r e w_f) e Gompertz (r e r_d) ao acúmulo de massa seca dos cultivares de cana-de-açúcar, observando-se significância estatística para todos pelo teste t ($p < 0,01$).

Tabela 4 - Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB92579, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012

Modelo	Parâmetro	DAP	GD
Expolinear	r	0,0488 ($\pm 3,1 \times 10^{-3}$)	0,00400 ($\pm 2,7 \times 10^{-4}$)
	c_m	2,44 ($\pm 0,43$)	0,219 ($\pm 0,043$)
	t_b	119 (± 8)	1395 (± 103)
Logístico	r	0,0438 ($\pm 2,2 \times 10^{-3}$)	0,00361 ($\pm 1,9 \times 10^{-4}$)
	w_0	0,204 ($\pm 0,037$)	0,271 ($\pm 0,048$)
	w_f	232 (± 38)	243 (± 46)
Gompertz	r	0,0517 ($\pm 1,7 \times 10^{-3}$)	0,00417 ($\pm 1,5 \times 10^{-4}$)
	r_d	0,00397 ($\pm 5,0 \times 10^{-4}$)	$30,8 \times 10^{-5}$ ($\pm 4,5 \times 10^{-5}$)

NOTA: Utilizou-se no modelo de Gompertz o mesmo valor de w_0 apresentado pelo logístico.

Tabela 5 - Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB867515, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012

Modelo	Parâmetro	DAP	GD
Expolinear	r	0,0662 ($\pm 4,9 \times 10^{-3}$)	0,00544 ($\pm 4,1 \times 10^{-4}$)
	c_m	2,85 ($\pm 0,40$)	0,244 ($\pm 0,036$)
	t_b	103 ($\pm 5,4$)	1180 (± 67)
Logístico	r	0,0578 ($\pm 3,1 \times 10^{-3}$)	0,00476 ($\pm 2,6 \times 10^{-4}$)
	w_0	0,0806 ($\pm 0,021$)	0,118 ($\pm 0,028$)
	w_f	241 (± 28)	242 (± 29)
Gompertz	r	0,0756 ($\pm 2,6 \times 10^{-3}$)	0,00608 ($\pm 2,1 \times 10^{-4}$)
	r_d	0,00652 ($\pm 5,6 \times 10^{-4}$)	$53,2 \times 10^{-5}$ ($\pm 5,0 \times 10^{-5}$)

NOTA: Utilizou-se no modelo de Gompertz o mesmo valor de w_0 apresentado pelo logístico.

Tabela 6 - Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB928064, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012

Modelo	Parâmetro	DAP	GD
Expolinear	r	0,0586 ($\pm 4,5 \times 10^{-3}$)	0,00487 ($\pm 3,9 \times 10^{-4}$)
	C_m	2,08 ($\pm 0,30$)	0,177 ($\pm 0,026$)
	t_b	99 (± 6)	1122 (± 77)
Logístico	r	0,0483 ($\pm 2,7 \times 10^{-3}$)	0,00400 ($\pm 2,4 \times 10^{-4}$)
	w_0	0,204 ($\pm 0,045$)	0,274 ($\pm 0,055$)
	w_f	214 (± 29)	215 (± 31)
Gompertz	r	0,0603 ($\pm 2,1 \times 10^{-3}$)	0,00490 ($\pm 1,8 \times 10^{-4}$)
	r_d	0,00559 ($\pm 5,6 \times 10^{-4}$)	45,8 $\times 10^{-5}$ ($\pm 5,1 \times 10^{-5}$)

NOTA: Utilizou-se no modelo de Gompertz o mesmo valor de w_0 apresentado pelo logístico.

Tabela 7 - Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliados para cana-de-açúcar, cultivar RB855453, tendo como variáveis independentes dias após o plantio (DAP) e graus-dia (GD). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses. Viçosa-MG, 2012

Modelo	Parâmetro	DAP	GD
Expolinear	r	0,0537 ($\pm 3,6 \times 10^{-3}$)	0,00441 ($\pm 3,0 \times 10^{-4}$)
	C_m	3,01 ($\pm 0,42$)	0,262 ($\pm 0,038$)
	t_b	104 (± 6)	1199 (± 77)
Logístico	r	0,0472 ($\pm 2,3 \times 10^{-3}$)	0,00389 ($\pm 1,9 \times 10^{-4}$)
	w_0	0,307 ($\pm 0,056$)	0,416 ($\pm 0,073$)
	w_f	283 (± 32)	287 (± 35)
Gompertz	r	0,0590 ($\pm 1,9 \times 10^{-3}$)	0,00476 ($\pm 1,6 \times 10^{-4}$)
	r_d	0,00562 ($\pm 5,1 \times 10^{-4}$)	45,3 $\times 10^{-5}$ ($\pm 4,6 \times 10^{-5}$)

NOTA: Utilizou-se no modelo de Gompertz o mesmo valor de w_0 apresentado pelo logístico.

Analisando os valores da taxa máxima de crescimento relativo (r) estimados pelos modelos expolinear, logístico e Gompertz para os cultivares RB92579, RB867515, RB928064 e RB855453 (Tabelas 4, 5, 6 e 7), pode-se observar que, independente do cultivar, os valores do parâmetro r estimados pelo modelo Gompertz foi maior que o observado nos demais modelos. Tendência similar foi relatada por Lyra et al. (2003) que, ao compararem as taxas máximas de crescimento relativo estimadas pelo modelo Gompertz com os valores observados, verificaram superestimavas da ordem de 50% desse parâmetro. Em concordância com esses resultados, Tei et al. (1996) relatam que o modelo Gompertz superestimou valores de r em 40% para a cultura da alface. Lyra et al. (2003) ressaltam que, do ponto de vista biológico, os valores

de parâmetro r ajustados pelo modelo de Gompertz devem ser interpretados com cautela.

Os valores de r estimados pelo logístico foi menor em relação aos estimados pelos demais modelos, com valores que variaram de 0,0439 a 0,0578 $\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$, quando se utilizou DAP como variável independente e de 0,0036 a 0,0048 $\text{g g}^{-1} \text{°Cd}^{-1}$ quando se adotou GD como variável independente. Lyra et al. (2003) observaram que os valores do parâmetro r estimados por esse modelo, com graus-dia e graus-dia efetivos, foram os que mais se aproximaram dos valores observados para três cultivares de alface, em comparação aos estimados pelos modelos exponencial e Gompertz. Lyra et al. (2008) ajustaram o modelo logístico ao acúmulo de matéria seca da parte aérea do milho em três épocas de plantio e observaram valores de taxa máxima de crescimento relativo que variaram de 0,0034 a 0,0107 $\text{g g}^{-1} \text{°C}^{-1}$ e 0,0516 a 0,1712 $\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$, utilizando as variáveis independentes graus-dia e dias após o plantio, respectivamente.

Dentre as cultivares estudadas, o maior valor de r foi apresentado pelo cultivar RB867515, independente do modelo. Considerando que os parâmetros estimados pelos modelos supracitados permitem interpretação biológica e r reflete a taxa máxima de crescimento relativo, pode-se inferir que, para as condições do presente estudo, o cultivar RB867515 respondeu melhor às condições ambientais em que o estudo foi conduzido.

Os menores valores de r foram observados no cultivar RB92579 para todos os modelos e variáveis independentes. Esse cultivar é bem adaptado às condições edafoclimáticas do Nordeste, caracterizada por apresentar elevadas temperaturas. Diversos estudos experimentais têm sido conduzidos com esse cultivar na região Nordeste do Brasil e mostram elevado desempenho produtivo nessas condições ambientais (ALMEIDA et al., 2008; SILVA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2010).

Verificou-se que os modelos estudados apresentaram ótimo desempenho, com valores elevados para o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), superiores a 0,93, para os quatro cultivares de cana-de-açúcar e para as duas variáveis independentes, dias após o plantio (DAP) e graus-dia acumulados após o plantio (GD). Isso indicou que, durante o período estudado,

a maior parte da variação do acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar foi explicada pelos modelos (Figuras 11, 12, 13 e 14).

Para os modelos expolinear e logístico, a utilização da variável DAP forneceu valores de R^2_{aj} ligeiramente superiores aos observados quando se utilizou GD, independente do cultivar. Moura et al. (2008) relatam essa mesma tendência com o modelo expolinear para a cultura do feijão-caupi. Em contraste, Lyra et al. (2003) obtiveram maiores valores de R^2_{aj} para esses modelos ao utilizarem a variável GD para o cultivo de alface em sistema hidropônico. Quanto ao modelo de Gompertz, os maiores R^2_{aj} foram obtidos quando se utilizou como variável independente GD em comparação a DAP para todos os cultivares (Figuras 11, 12, 13 e 14, letras E e F). Esses resultados corroboram os obtidos por Tei et al. (1996) para o cultivo de beterraba.

Embora os ajustes dos modelos expolinear e logístico, obtidos no presente estudo, tenham sido melhores para a variável DAP, espera-se que a utilização do tempo térmico como variável independente forneça melhores estimativas do acúmulo de matéria seca das plantas, uma vez que as taxas dos processos metabólicos envolvidos no crescimento das plantas são dependentes da temperatura. Os parâmetros dos modelos estudados (expolinear, logístico e Gompertz), tendo como variável independente DAP, foram ajustados para as condições ambientais de Viçosa para o período compreendido entre o início da estação da primavera e final do outono. Dessa forma, se os parâmetros obtidos nesse estudo, tendo DAP como variável independente, forem utilizados para a estimativa do acúmulo de massa seca dos cultivares RB92579, RB867515, RB928064 e RB855453 em outras regiões ou estações do ano, cujas condições ambientais sejam diferentes das observadas no presente estudo, espera-se que os valores obtidos não sejam coerentes com os valores reais.

O modelo expolinear foi o que apresentou melhor ajuste da curva de acúmulo de matéria seca com relação aos outros modelos para as duas variáveis independentes (Figuras 11, 12, 13 e 14, letras A e B). Os valores de R^2_{aj} apresentados por este modelo estiveram compreendidos entre 0,9326 e 0,9476, quando se utilizou a variável independente GD, e entre 0,9350 e 0,9484 quando foi utilizada DAP como variável independente. Confalone et al.

(2010) avaliaram a adequação do modelo expolinear para prever as modificações de crescimento de cultivares de soja submetidas ao déficit hídrico. Os autores relatam que esse modelo forneceu simulações satisfatórias da variação do crescimento, com valores de R^2 da ordem de 0,99. Costa et al. (1999), trabalhando com a mesma cultura, utilizaram o modelo expolinear para avaliar os efeitos do estresse hídrico no desenvolvimento das plantas e observaram valores de R^2 que variaram de 0,97 a 0,99.

Com exceção do cultivar RB928064, os valores de R^2_{aj} do modelo logístico observados no presente estudo foram da ordem de 0,94 (Figuras 11, 12, 13 e 14, letras B e C). Santos et al. (2009) obtiveram valores de coeficiente de determinação da ordem de 0,99 quando utilizaram este modelo em simulações do acúmulo de matéria fresca da cana-de-açúcar submetida a diferentes fontes de fósforo. Em estudo realizado com a cultura do milho, Lyra et al. (2008) relatam ajuste satisfatório do modelo logístico aos dados de matéria seca da parte aérea (folhas, caule e espigas), com valores de R^2 variando de 0,86 a 0,97. Andrade Neto et al. (2010), avaliando os efeitos de diferentes adubos verdes sobre o crescimento e produtividade do cultivar de sorgo BR 601, obtiveram ajuste satisfatório desse modelo aos valores de matéria seca e fresca da parte aérea e altura das plantas, cujos valores do coeficiente de determinação estiveram compreendidos entre 0,80 a 0,94, 0,91 a 0,99 e 0,91 a 0,99 para as variáveis massa fresca de parte aérea, massa seca da parte aérea e altura de planta, respectivamente. Sepaskhah et al. (2011) utilizaram indicadores de precisão para avaliar a capacidade do modelo logístico em simular o acúmulo de matéria seca e o rendimento de grãos do milho em diferentes condições de suprimento de água e nitrogênio, concluindo que o modelo apresentou resultados satisfatórios, com exatidão aceitável.

Similarmente aos demais modelos, o de Gompertz forneceu estimativas satisfatórias do crescimento dos cultivares de cana-de-açúcar durante a fase de formação. Moura et al. (2008) avaliaram o ajuste dos modelos expolinear, logístico e de Gompertz ao acúmulo de matéria seca do milho e feijão-caupi em dois sistemas de cultivo. Segundo os autores, os melhores resultados foram apresentados pelo modelo de Gompertz. Os valores de R^2_{aj} obtidos por esse modelo no presente estudo estão em conformidade com os encontrados por Simões et al. (2005), ao ajustarem o mesmo para as

variáveis biomassa total e produtividade da cana-de-açúcar para a região de Araras-SP.

Analisando as Figuras 11, 12, 13 e 14, letras A e B, pode-se verificar que os valores estimados pelo modelo expolinear estiveram mais próximos da linha 1:1, indicando, assim, que houve maior proximidade dos valores estimados por esses modelos em relação aos valores observados. Em contrapartida, constatou-se maior tendência do modelo em superestimar os valores iniciais de matéria seca em relação aos demais. Esse mesmo padrão foi relatado por Tei et al. (1996) para a cultura do alface. Por outro lado, Simões et al. (2005), estudando o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar na região de Araras-SP, afirmam que este modelo apresentou boas estimativas do acúmulo de matéria seca da planta, sobretudo no início e fim do ciclo.

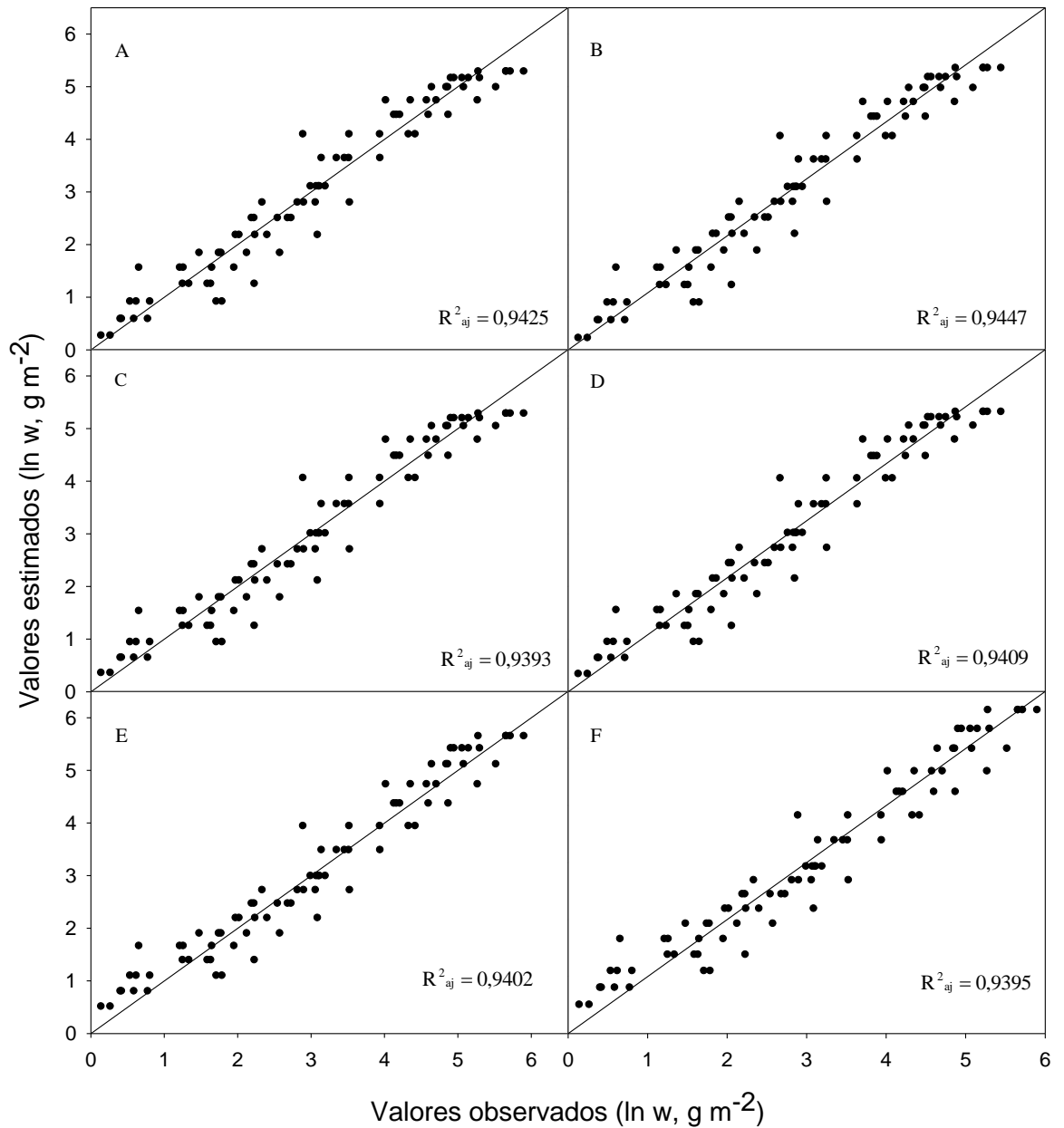


Figura 11 - Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB92579.

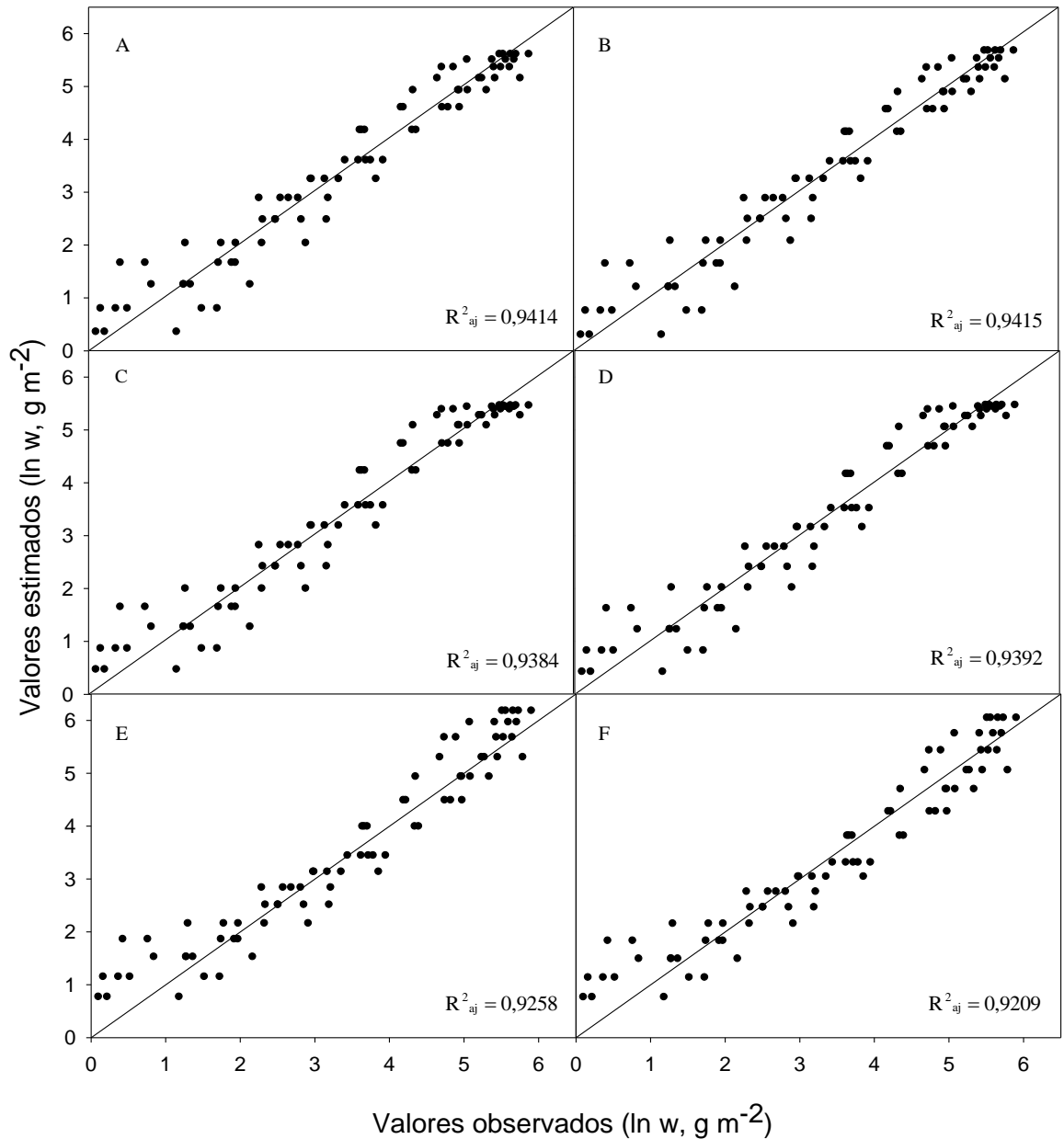


Figura 12 - Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos exponencial (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB867515.

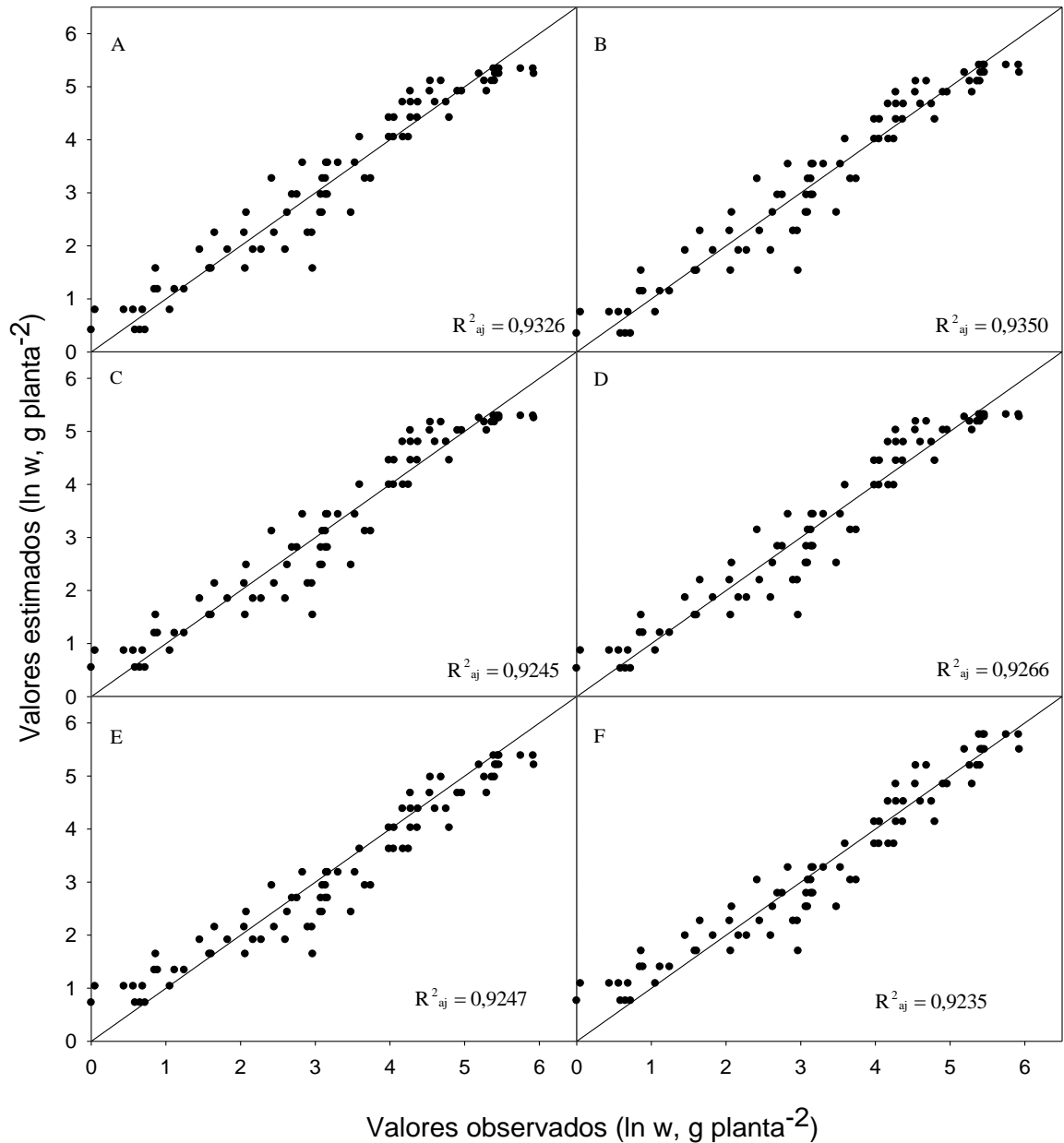


Figura 13 - Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB928064.

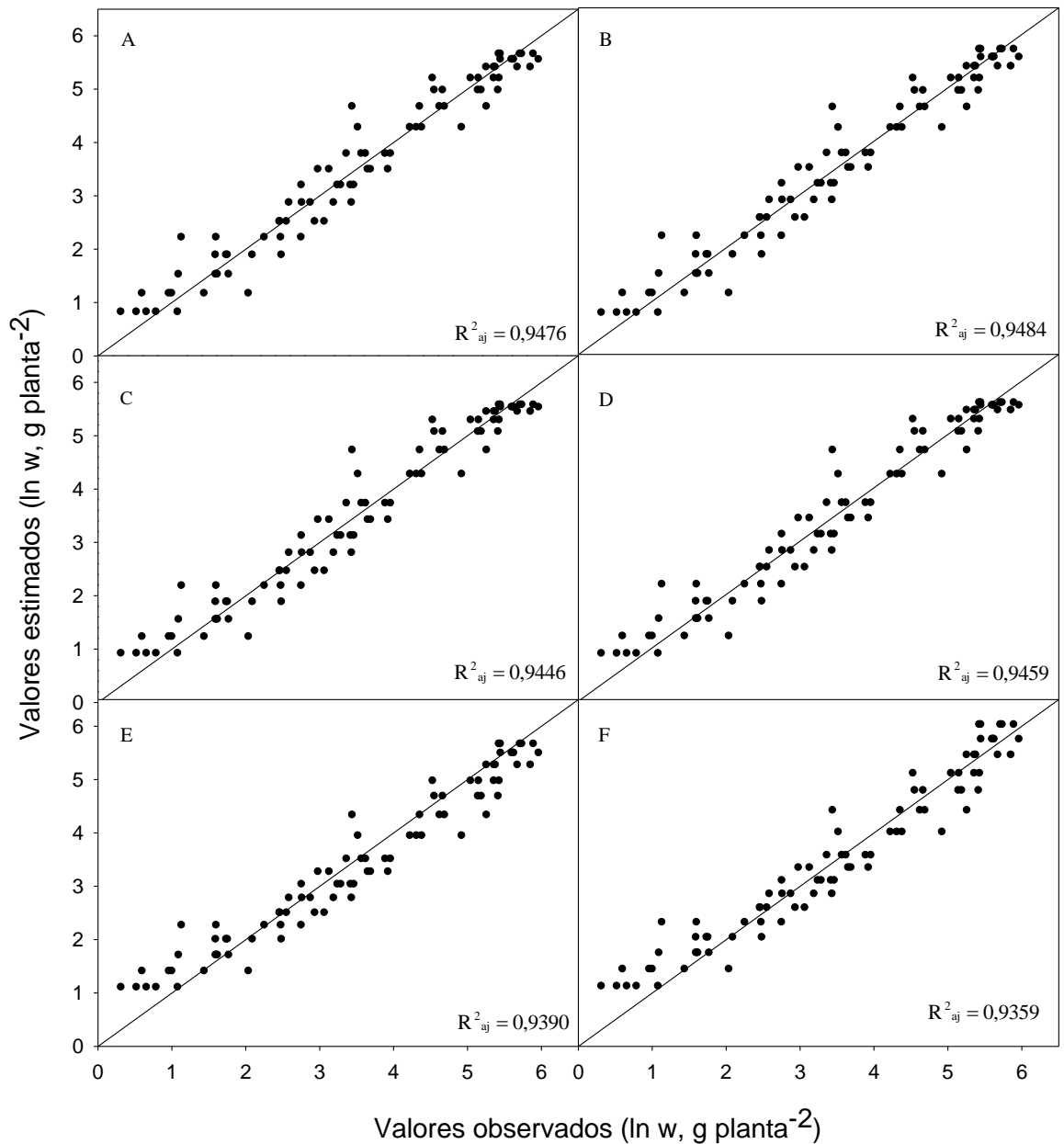


Figura 14 - Valores de matéria seca acumulada durante a fase de formação (w), observada e estimada pelos modelos expolinear (A,B), logístico (C,D) e Gompertz (E,F), tendo como variáveis independentes dias após o plantio (A, C, E) e graus-dia (B, D e F), para cana-de-açúcar, cultivar RB855453.

5.1.3. Estimativa do acúmulo de matéria seca por meio do modelo expolinear

Com o propósito de visualizar o padrão de variação do acúmulo de matéria seca, ao longo do período de formação dos cultivares de cana-de-açúcar, os valores ajustados dos parâmetros c_m , r e t_b (Tabelas 4, 5, 6 e 7) foram inseridos no modelo expolinear. Entretanto, dessa vez, sem a aplicação do logaritmo (Equação 14):

$$w = \left(\frac{c_m}{r} \right) \cdot \ln(1 + \exp(r \cdot (x - t_b))) \quad (14)$$

Nas Figuras 15 e 16 são apresentados os valores acumulados de massa seca dos cultivares, ao longo do período experimental, os quais foram estimados pelo modelo expolinear. O princípio básico desse modelo é que a taxa de crescimento da cultura é proporcional à radiação solar interceptada e que o crescimento da planta ocorre em duas fases distintas. Na primeira, em que o dossel consiste de plantas jovens e isoladas, o acúmulo de massa seca é exponencial e a taxa de crescimento aumenta linearmente. Nessa fase, a cobertura do terreno é mínima, sendo que o crescimento da planta ocorre sem sombreamento mútuo e sua duração varia de acordo com as condições ambientais. A segunda fase consiste de um período de crescimento linear, na qual é constatada a interceptação máxima da radiação fotossinteticamente ativa.

Verificou-se, no presente estudo, que o acúmulo de biomassa seca no início do período foi lento, até por volta dos 1200 °Cd (105 DAP). Nesse período, os valores observados de massa seca dos cultivares estiveram próximos entre si, variando de 12,2 a 20,5 g planta⁻¹. A partir desse momento, iniciou-se uma fase caracterizada por intenso crescimento, onde o cultivar RB92579 apresentou menor massa seca acumulada que os demais. Ao final do período experimental, a massa seca do cultivar RB855453 foi maior em comparação ao RB867515, as quais se destacaram em relação às cultivares RB928064 e RB92579.

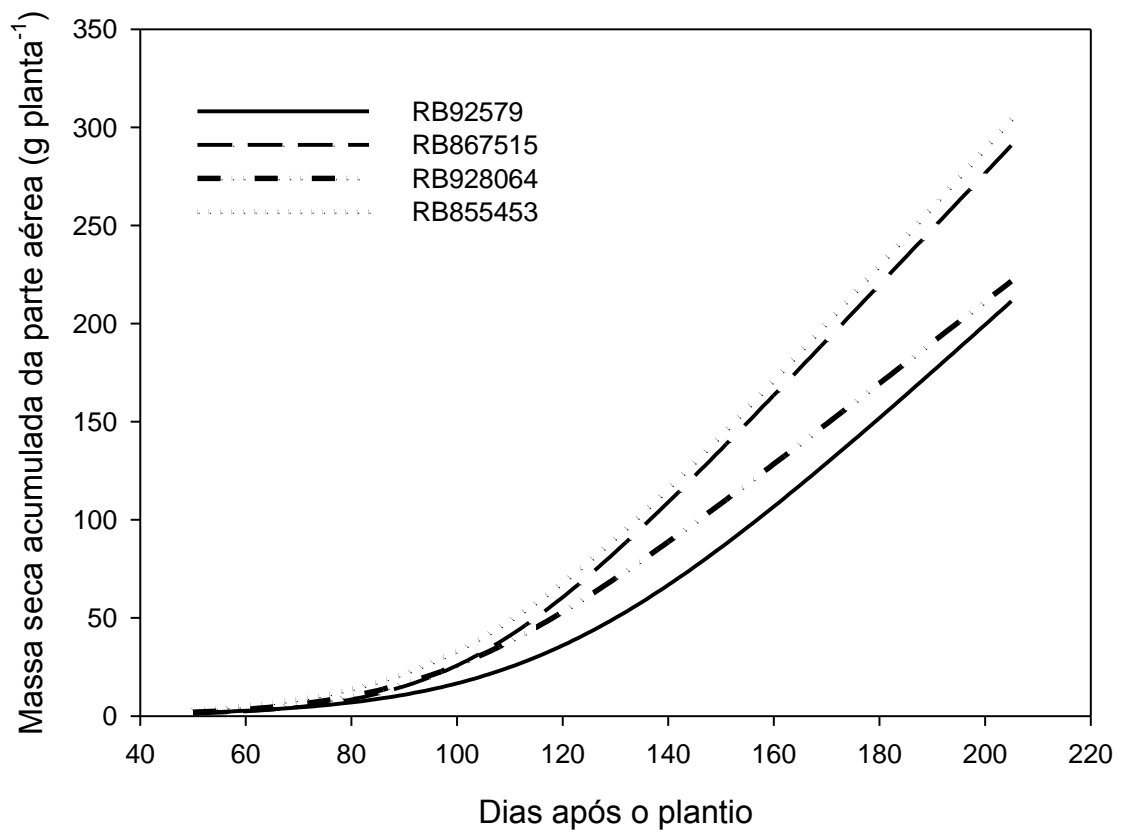


Figura 15 - Massas secas acumuladas da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar, estimadas pelo modelo expolinear, utilizando-se, como variável independente, dias após o plantio para as condições de Viçosa, MG.

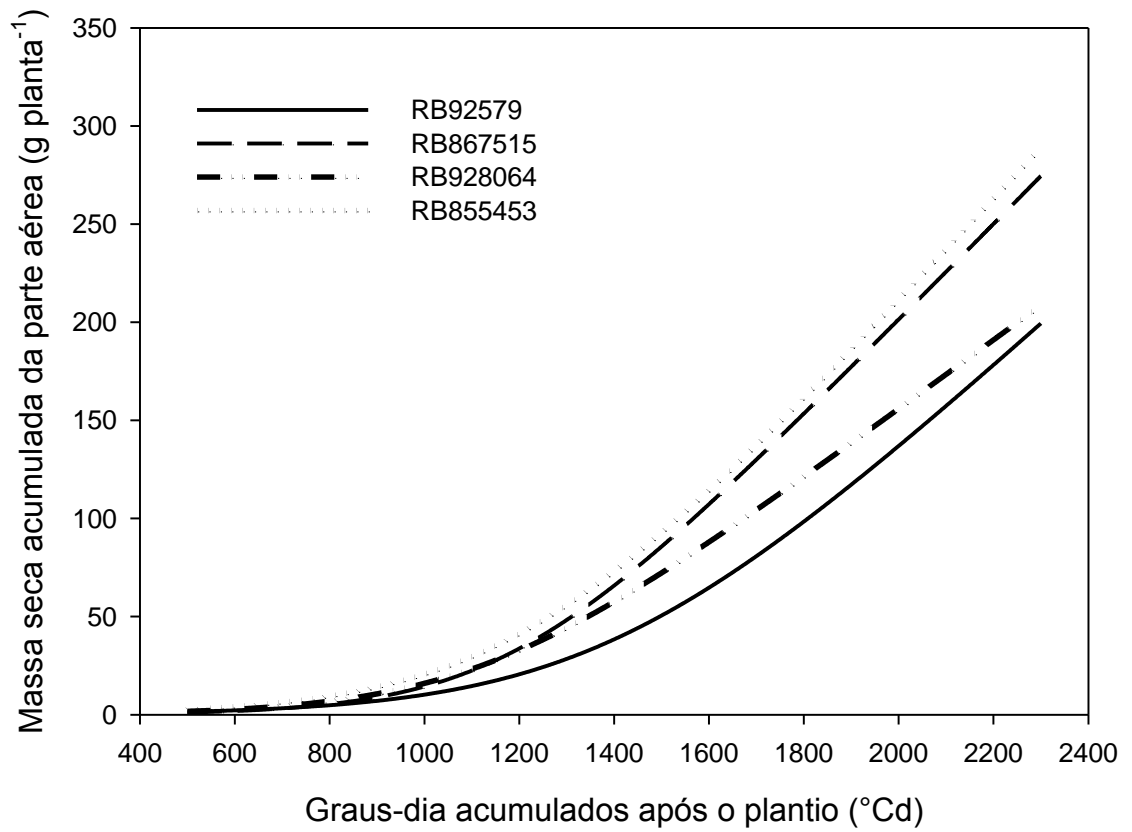


Figura 16 - Massas secas acumuladas da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar, estimadas pelo modelo expolinear, utilizando-se, como variável independente, graus-dia acumulados após o plantio para as condições de Viçosa, MG.

5.2. Experimento em casa-de-vegetação

5.2.1. Elementos meteorológicos

Na Figura 17 são apresentados os valores dos seguintes elementos meteorológicos observados no interior da casa-de-vegetação: a) radiação solar global (R_g) e déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) (17A); b) temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}) (17B); c) velocidade do ar (u) (17C). Os valores apresentados da radiação solar global são referentes à integração das medidas instantâneas ao longo do período diurno, enquanto as demais variáveis referem-se às médias diárias obtidas a partir de medidas realizadas em intervalos de 1 minuto.

Entre dezembro de 2011 e abril de 2012, a temperatura média do ar foi 24,3 °C, com extremos de 20,0 e 27,3 °C (Figura 17B). A partir do mês de abril, ocorreu decréscimo da temperatura, quando os valores médios foram da ordem de 18,9 °C. Os maiores valores de temperatura ocorreram entre meados de janeiro a março, juntamente com a menor umidade relativa do ar, proporcionando valores de DPV_{ar} que atingiram até 12,41 hPa (17/01/2012) (Figura 17A).

Em geral, os valores de R_g no interior da casa-de-vegetação foram menores que os observados no ambiente externo (Figura 10), atenuados pelo filme plástico que absorveu e refletiu parte da radiação solar incidente na cobertura da instalação. Os valores máximo e mínimo de R_g observados durante o período experimental foram 22 e 1,98 MJ m⁻² d⁻¹, os quais foram observados respectivamente nos dias 17/01/2012 e 14/05/2012 (Figura 17A).

No que se refere à velocidade do ar, foram constatados valores médios de 0,17 m s⁻¹ durante o período experimental, que são inferiores aos observados em condições de campo aberto, em decorrência da presença das telas plásticas nas laterais da casa-de-vegetação (Figura 17C).

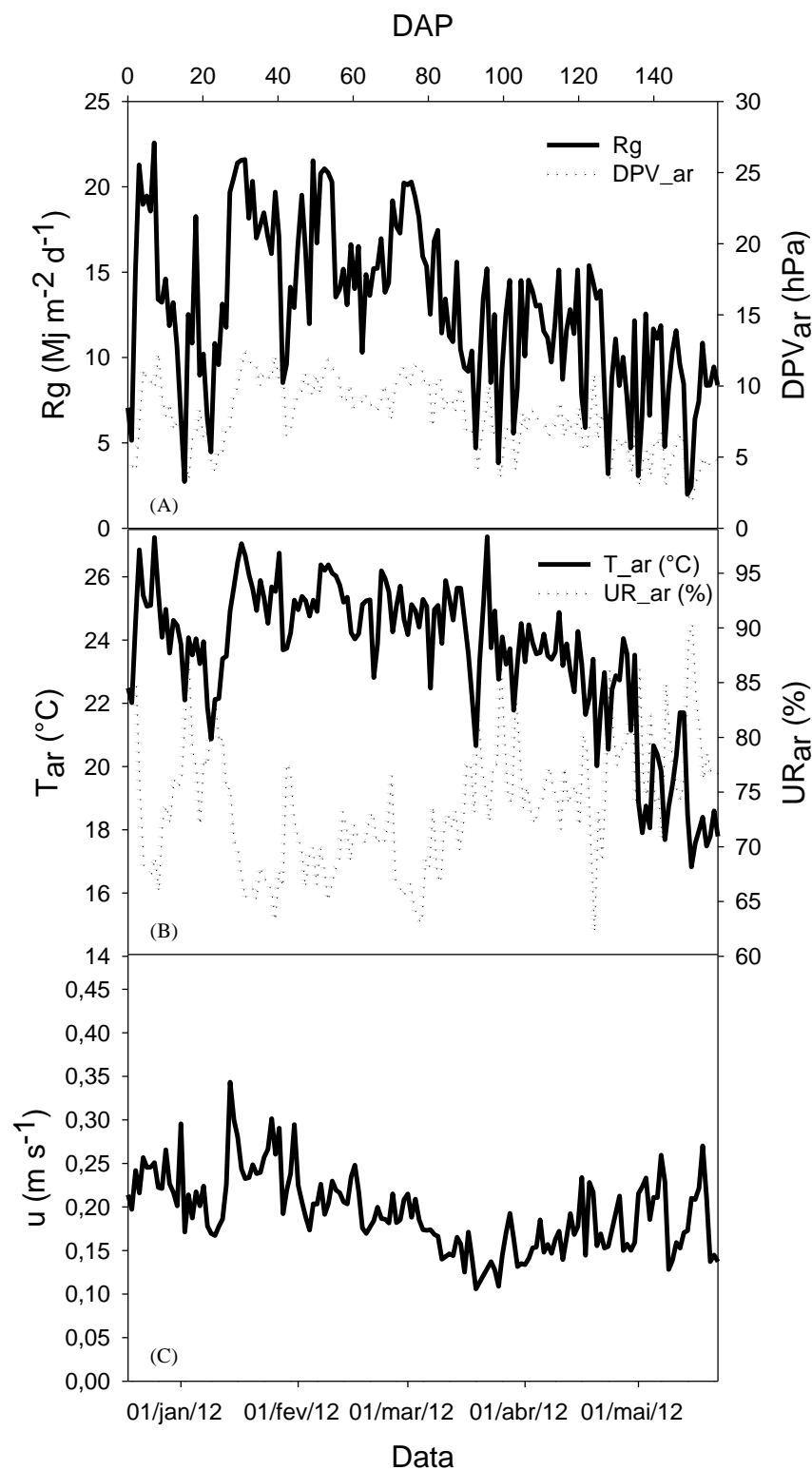


Figura 17 - Valores diários de radiação solar global (R_g), déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}), velocidade do ar (u), temperatura (t_{ar}) e umidade relativa do ar (UR_{ar}), ao longo do período de formação dos cultivares de cana-de-açúcar em casa-de-vegetação, Viçosa, MG.

5.2.2. Massa seca da parte aérea

5.2.2.1. Ajuste do modelo sigmoidal aos dados de massa seca da parte aérea

O modelo sigmoidal com três parâmetros, tendo como variável independente graus-dia acumulados após o plantio (GD), apresentou ajuste satisfatório ao acúmulo de massa seca da parte aérea dos cultivares estudados durante o período de 0 a 157 DAP. Na Figura 18 são apresentadas as curvas ajustadas para os cultivares de cana-de-açúcar, nos diferentes tratamentos com estresse hídrico. Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros ajustados do modelo, onde se verifica elevados valores para o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), estando eles compreendidos entre 0,9885 e 0,9976 (ausência de estresse), 0,8798 e 0,9645 (estresse leve), 0,9129 e 0,9544 (estresse moderado) e 0,9153 e 0,9609 (estresse severo). Isso indicou que houve alta correlação entre a variável massa seca acumulada dos cultivares e o tempo térmico acumulado, independente do nível de estresse aplicado. Oliveira et al. (2010) obtiveram valores de R^2 que variaram de 0,91 a 0,98, quando ajustaram o mesmo modelo ao acúmulo de matéria seca de cultivares de cana-de-açúcar sob condições de irrigação plena no estado de Pernambuco. Silva et al. (2009) utilizaram o modelo sigmoidal para quantificar o acúmulo de massa seca do girassol ornamental cultivado em ambiente protegido, que foi submetido a diferentes valores de condutividade elétrica da solução nutritiva, e verificaram excelente correlação entre esta variável de crescimento e os graus-dia acumulados. Gava et al. (2001) obtiveram ajuste sigmoidal para a massa seca acumulada pela parte aérea da cana-de-açúcar e constataram três fases de desenvolvimento do vegetal. Na primeira, ocorrida de 0 aos 60 dias após o corte (DAC), o crescimento foi lento e a planta acumulou cerca de 6% do total. Na segunda fase, ocorrida dos 60 aos 210 DAC, a planta apresentou elevada taxa de crescimento, chegando a acumular 81% da matéria seca e, por fim, na terceira fase, caracterizada como de maturação, o acúmulo foi em média de 13% da massa seca total.

Tabela 8 - Parâmetros do modelo sigmoidal (a, b e x_0) e coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}), para o acúmulo de matéria seca da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 10°C, nas condições de casa-de-vegetação, Viçosa-MG

		Parâmetros do Modelo Sigmoidal			
		a	b	x_0	R^2_{aj}
Ausência de estresse	RB92579	262,2 ± (14,9)	294,2 ± (26,1)	1540,9 ± (46,1)	0,9885
	RB867515	412,7 ± (14,5)	338,4 ± (13,9)	1627,5 ± (29,7)	0,9976
	RB928064	293,9 ± (11,1)	339,1 ± (19,0)	1487,6 ± (34,3)	0,9950
	RB855453	393,8 ± (17,3)	347,1 ± (18,4)	1600,5 ± (38,4)	0,9959
Estresse leve	RB92579	62,7 ± (3,01)	—	1090 ± (63,2)	0,8798
	RB867515	91,7 ± (3,46)	—	1087 ± (52,5)	0,9304
	RB928064	92,7 ± (2,28)	—	999 ± (36,4)	0,9645
	RB855453	108,0 ± (3,42)	—	1110 ± (43,8)	0,9515
Estresse moderado	RB92579	70,2 ± (2,94)	—	1137 ± (51,1)	0,9138
	RB867515	121,8 ± (4,79)	—	1272 ± (48,0)	0,9544
	RB928064	76,8 ± (2,48)	—	1018 ± (47,1)	0,9421
	RB855453	94,0 ± (3,73)	—	1057 ± (56,9)	0,9129
Estresse severo	RB92579	70,3 ± (3,02)	—	1165 ± (51,6)	0,9153
	RB867515	106,1 ± (3,57)	—	1219 ± (42,66)	0,9609
	RB928064	87,8 ± (2,56)	—	1053 ± (41,53)	0,9576
	RB855453	111,7 ± (4,77)	—	1154 ± (57,26)	0,9496

- NOTA: 1) Os parâmetros do modelo sigmoidal foram significativos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t;
- 2) Os valores entre parênteses correspondem ao erro padrão de estimativa dos parâmetros;
- 3) O parâmetro "b" está relacionado com a taxa de crescimento relativo máxima, que ocorre após a emergência. Assim, para os tratamentos com estresse hídrico leve, moderado e severo, iniciados após 60 DAP, este parâmetro foi estimado, para os respectivos cultivares, pelos valores apresentados nas linhas iniciais da presente tabela.

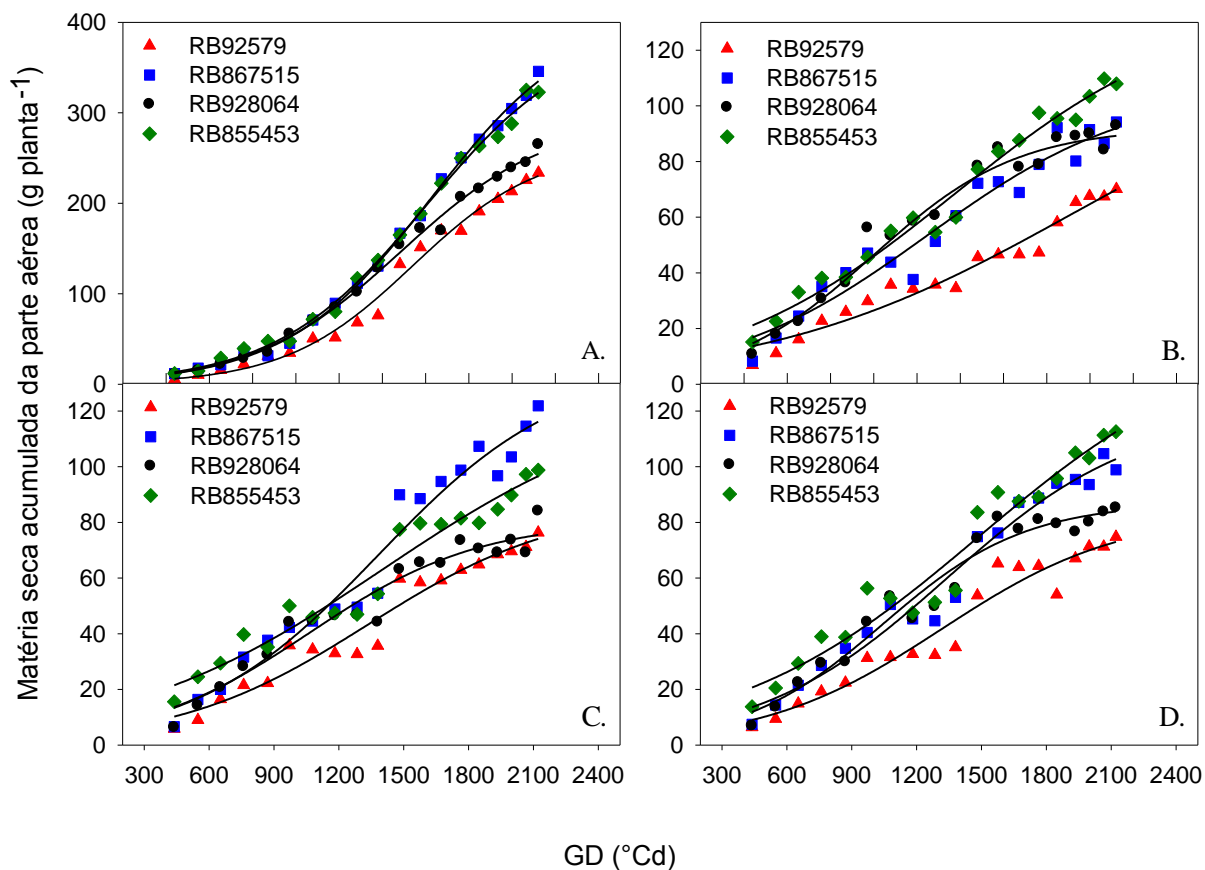


Figura 18 - Massa seca da parte aérea (MSP) de cultivares de cana-de-açúcar submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), moderado (C) e severo (D), ao longo do período de formação, em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD) sob condições de casa-de-vegetação, Viçosa-MG.

A partir da análise da variância dos dados obtidos ao final do período experimental (157 DAP), observou-se interação significativa entre os fatores níveis de estresse e cultivares, indicando que a matéria seca acumulada pela parte aérea dos cultivares é influenciada pelos níveis de estresse e vice-versa (Tabela 9).

Devido à condição plena de suprimento hídrico na qual as plantas do tratamento com ausência de estresse estiveram submetidas ao longo do período experimental, a matéria seca acumulada pela parte aérea foi superior ao observado nas plantas dos demais níveis de estresse (Figura 18A). Como, neste tratamento, os cultivares foram conduzidos sob tensões de água próximas à capacidade de campo do substrato, o crescimento foi contínuo até o fim do período de estudo, período onde se observou diferença estatística no acúmulo

de massa seca entre os cultivares, sendo o RB92579 que apresentou menor valor em relação aos demais (Tabela 10).

As limitações na produtividade das culturas causadas pela falta de água são dependentes da intensidade e frequência em que o déficit hídrico ocorre (SANTOS; CARLESSO, 1998). Quando o estresse é intenso, os mecanismos morfofisiológicos são severamente afetados e ocorrem limitações ditas não estomáticas. Nessas condições, as plantas diminuem o crescimento, o tamanho das folhas e aumentam a senescência foliar (CHAVES et al., 2009).

No presente estudo, verificou-se que a cana-de-açúcar é altamente sensível a tensões de água no substrato situadas entre a capacidade de campo e 60 kPa. A Figura 18B apresenta a variação de massa seca dos cultivares submetidos a esse tratamento. Verificaram-se reduções acentuadas na massa seca causadas por esse valor de tensão de água no substrato, que variaram entre 66,5 (RB928064) e 72,7% (RB92579) (Tabela 10). Nos tratamentos referidos como estresse moderado (90 kPa) e severo (120 kPa) (Figura 18, letras C e D), embora os valores de tensão aplicados tenham sido superiores, o acúmulo de massa seca dos cultivares estiveram próximos aos observados no tratamento referido como estresse leve, não apresentando diferenças estatísticas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 10). Isso indica que o valor de tensão referente ao tratamento com estresse leve (60 kPa) causou sérios danos às plantas.

Tabela 9 – Resumo da análise de variância referente à matéria seca da parte aérea (MSP), acumulada aos 157 DAP, de quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidos a quatro níveis de estresse hídrico

FV	Teste F	
	GL	MSP
Estresse	3	395,85 **
Cultivar	3	10,79 **
Estresse x cultivar	9	2,35 *
Resíduo	64	--
CV (%)		19,26

** Significativo a 1% de probabilidade; * Significativo a 5% de probabilidade

Nos tratamentos moderado e severo (Figura 18, letras C e D), ocorreram decréscimos na massa seca acumulada, ao final do período experimental, de até 76,7% (RB855453) e 79,0% (RB855453), respectivamente

(Tabela 10). Esses valores são superiores ao observado por Inman-Bamber (2004), que relatou redução de 35% na fitomassa da cana-de-açúcar em consequência da deficiência hídrica.

Tabela 10 - Valores médios da massa seca da parte aérea, acumulada aos 157 DAP, para quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidos a quatro níveis de estresse hídrico

Cultivares	Massa seca da parte aérea (g planta ⁻¹)			
	Níveis de estresse			
	Ausência	Leve	Moderado	Severo
RB92579	301,1 Ab	82,2 Ba	76,7 Ba	65,3 Ba
RB867515	395,3 Aa	97,1 Ba	117,4 Ba	85,3 Ba
RB928064	414,1 Aa	134,3 Ba	94,6 Ba	88,3 Ba
RB855453	405,3 Aa	113,1 Ba	102,4 Ba	85,2 Ba

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.2.2.2. Taxas de crescimento absoluto e relativo

Na Figura 19 são apresentadas as curvas da taxa de crescimento absoluto da cultura (TCC) para as quatro cultivares submetidas aos tratamentos sem e com estresse hídrico. Em todos os casos, a TCC apresentou um formato de sino, com valores baixos no início do ciclo, aumentando rapidamente até atingir um valor máximo, para em seguida decrescer. Essa mesma tendência foi relatada por Gava et al. (2001), ao estudarem as taxas de crescimento da cana-de-açúcar, e por Silva et al. (2009), avaliando o crescimento da cana-de-açúcar submetida a diferentes fontes de fósforo.

Os maiores valores de TCC foram observados no tratamento onde as plantas não sofreram estresse hídrico, quando foi constatado, até os 500 °Cd, crescimento lento, sendo que o cultivar RB92579 apresentou a menor TCC (0,012 g °Cd⁻¹). A partir dos 500°Cd, houve aumento gradual até atingir o valor máximo, por volta dos 1600 °Cd. Nesse período, os valores da TCC máxima, em ordem decrescente, foram: 0,305 (RB867515), 0,284 (RB855453), 0,223 (RB92579) e 0,217 g °Cd⁻¹ (RB928064). Estes coincidiram com a época em que foram observados os maiores valores de temperatura do ar no interior da casa-de-vegetação (Figura 17).

Ramesh (2000) relacionou as reduções na TCC, ocorridas durante a fase de maturação de cultivares de cana-de-açúcar, com a queda da temperatura do ar. Ainda segundo o autor, os cultivares estudados apresentaram três fases distintas de TCC, sendo a primeira, identificada como fase de formação, caracterizada por crescimento lento e valores próximos a $17,82 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Na segunda fase, caracterizada por um crescimento intenso, o autor constatou que a TCC alcançou $26,62 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e, na terceira fase, o crescimento foi lento novamente, com valores de TCC da ordem de $16,29 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Com a imposição dos níveis de estresse hídrico, a TCC dos cultivares foi severamente afetada, com quedas superiores a 70%, comparadas ao tratamento com ausência de estresse. No tratamento com estresse hídrico leve (Figura 19 B), os valores máximos de TCC ocorreram por volta dos 1100°Cd para os cultivares RB855453 ($0,078 \text{ g }^\circ\text{Cd}^{-1}$), RB867515 ($0,068 \text{ g }^\circ\text{Cd}^{-1}$) e RB92579 ($0,053 \text{ g }^\circ\text{Cd}^{-1}$). O cultivar RB928064 apresentou reduções mais imediatas na TCC após a imposição dos tratamentos com estresse, sendo observada por volta dos 1000°Cd , enquanto as demais apresentaram redução na TCC por volta dos 1100°Cd .

No tratamento em que as plantas foram submetidas ao estresse, referido no presente estudo como moderado (Figura 19 C), ocorreram decréscimos na TCC da ordem de 76 (RB855453), 74 (RB928064), 73 (RB92579), e 70% (RB867515). A cultivar RB867515 apresentou o maior valor de TCC ($0,090 \text{ g }^\circ\text{Cd}^{-1}$), o que lhe proporcionou os maiores valores acumulados, em comparação às demais (Tabela 10). Nesse tratamento, as TCC dos cultivares RB855453, RB92579 e RB928064 foram $0,067$, $0,060$ e $0,056 \text{ g }^\circ\text{Cd}^{-1}$, respectivamente. O cultivar RB867515 se destacou em relação aos demais no que se refere à tolerância para esse nível de estresse hídrico. Este cultivar manteve, mesmo após a imposição do estresse iniciado aos 870°Cd , o crescimento a taxas crescentes e, apenas aos 1200°Cd , demonstrou reduções na TCC. Nos cultivares RB92579, RB928064 e RB855453, a TCC começou a decrescer por volta de 1100 , 1020 e 1050°Cd , respectivamente (Figura 19).

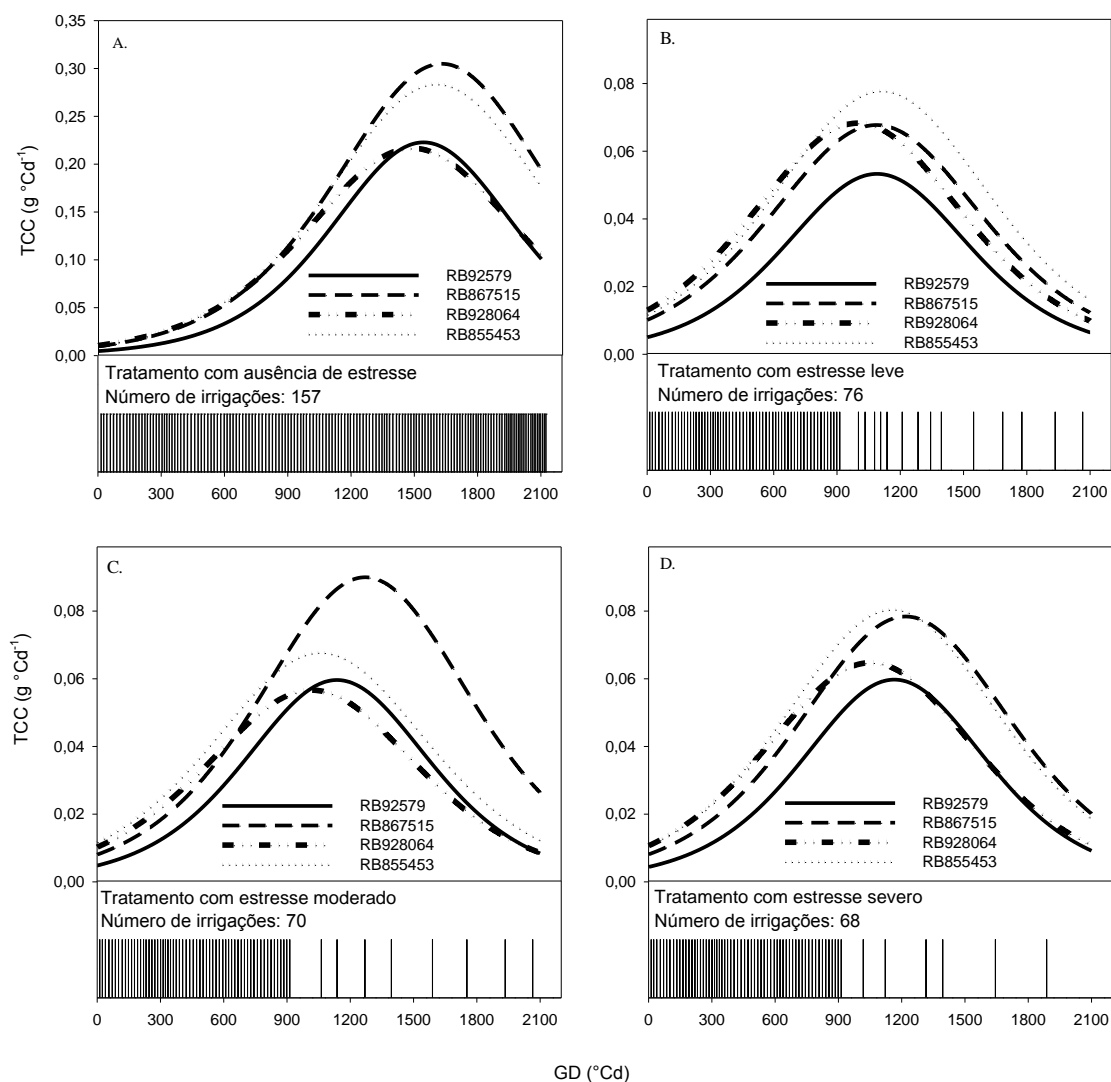


Figura 19 - Taxa de crescimento absoluto da cultura (TCC) e número de irrigações aplicadas aos cultivares de cana de açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 10°C, para as condições de campo, Viçosa-MG.

Similarmente ao observado nos tratamentos com estresse leve e moderado, as TCC dos cultivares submetidos ao tratamento com estresse severo (Figura 19D) foram reduzidas, cujos valores máximos variaram de 0,060 (RB92579) a 0,080 g °Cd⁻¹ (RB855453). O cultivar RB928064 apresentou reduções mais imediatas na TCC após a imposição do estresse. Ao final do período experimental, os cultivares RB867515 e RB855453 apresentaram maiores TCC em relação aos demais, sendo os valores, em ordem

decrecente, 0,020 (RB867515), 0,018 (RB855453), 0,011 (RB928064) e 0,0092 g °Cd⁻¹ (RB92579).

As reduções na TCC observadas no presente estudo foram superiores às observadas por Inman-Bamber & Jager (1986), ao avaliarem aspectos do crescimento da cana-de-açúcar submetida à restrição de água sob condições de ambiente protegido, relatando decréscimos da ordem de 50 %.

Na Figura 20, são apresentados os valores da taxa de crescimento relativo (TCR) dos cultivares submetidos aos níveis de estresse. Verificou-se que ao contrário da TCC, que apresentou baixos valores iniciais, a TCR foi máxima no início do desenvolvimento, indicando que, nessa fase, houve maior incremento de biomassa em relação a sua massa anterior. Em seguida, os valores de TCR diminuíram gradualmente até o fim do período de estudo (2100 °Cd). Essa mesma tendência foi observada por Gava et al. (2001), ao avaliarem a influência da adubação nitrogenada e da palhada nas taxas de crescimento da cana-de-açúcar. Oliveira et al. (2005), estudando o crescimento e desenvolvimento de cultivares de cana-de-açúcar, relatam que a TCR foi máxima na fase inicial, e que grande parte dos fotoassimilados da planta, nesta fase, foram alocados para o crescimento foliar.

No tratamento em que as plantas não sofreram estresse hídrico (Figura 20 A), os valores de TCR mantiveram-se elevados e praticamente constantes até por volta dos 1200 °Cd, momento a partir do qual ocorreram decréscimos graduais até o final do período experimental, quando os valores médios foram da ordem de 0,0005 g g⁻¹ °Cd⁻¹.

Embora a redução na TCR seja natural, à medida que ocorre o crescimento da planta, foi verificado no presente estudo que o déficit hídrico antecipou essas reduções. Este fato também foi relatado por Gava et al. (2001), que observaram decréscimos nessa taxa à medida que a planta cresceu, devido, dentre outros fatores, ao aumento da competição intraespecífica pelos principais fatores ambientais responsáveis pelo crescimento vegetal. Enquanto os cultivares que não sofreram estresse hídrico apresentaram valores de TCR próximos a 0,0028 g g⁻¹ °Cd⁻¹ aos 1200°Cd (Figura 20 A), nos demais tratamentos (Figura 20, letras B, C e D) esses valores foram da ordem de 0,0012 g g⁻¹ °Cd⁻¹, o que correspondeu a reduções superiores a 50 %.

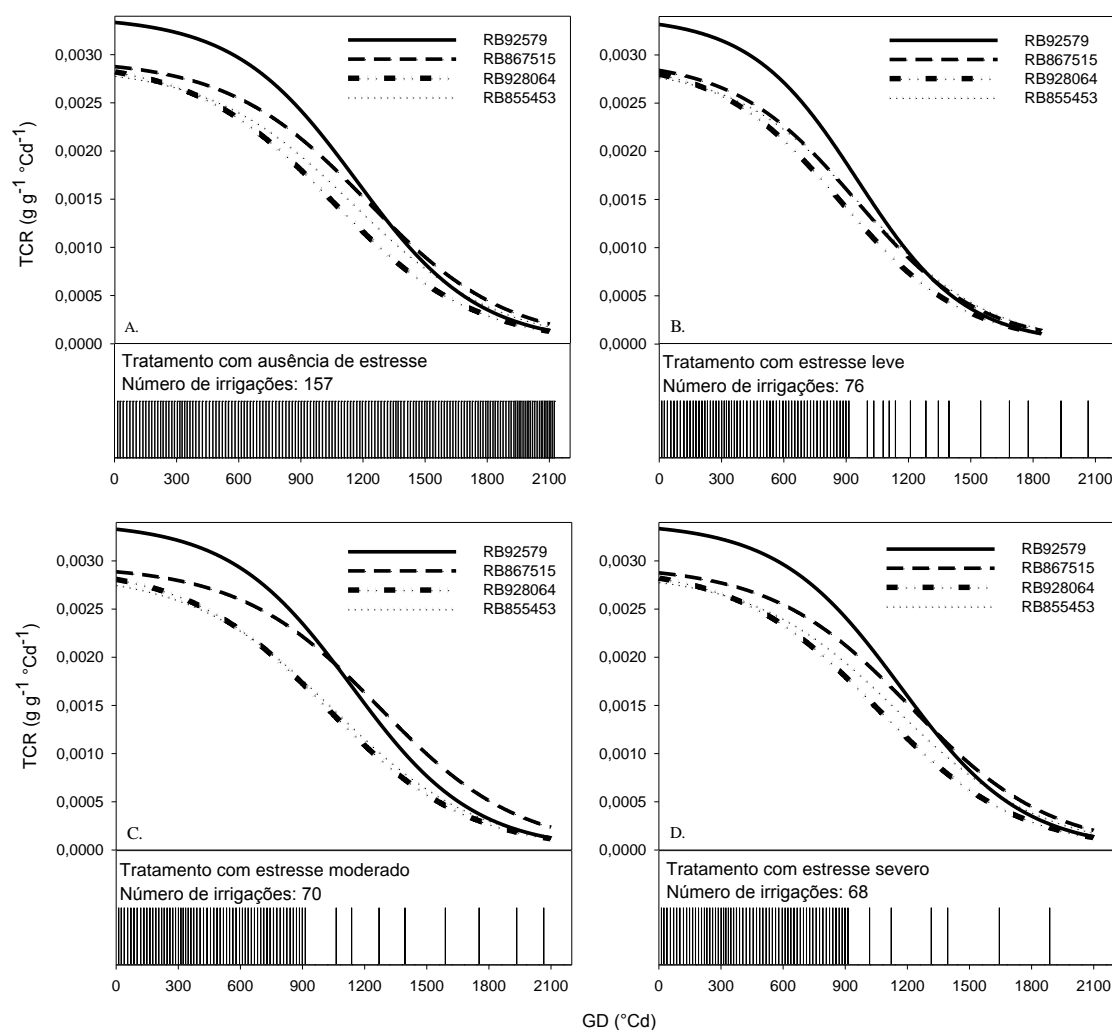


Figura 20 - Taxa de crescimento relativo (TCR) dos cultivares de cana de açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 10°C, para as condições de campo, Viçosa-MG.

5.2.3. Estatura dos colmos

5.2.3.1. Ajuste do modelo sigmoidal aos dados de estatura dos colmos

O conhecimento do padrão do crescimento dos colmos em altura é de grande importância, devido à sua correlação positiva com a produtividade da cultura (CARLIN et al., 2008). Na Figura 21, é apresentada a variação da estatura do colmo dos cultivares de cana-de-açúcar durante o período experimental.

Tabela 11- Parâmetros estimados pelo modelo sigmoidal (a, b e x_0) e coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}), para a estatura do colmo de cultivares de cana-de-açúcar, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16 °C, Viçosa-MG

		Parâmetros do Modelo Sigmoidal			
		a	b	x_0	R^2_{aj}
Ausência de estresse	RB92579	206,9 ± (17,3)	213,9 ± (18,8)	925,9 ± (43,1)	0,9901
	RB867515	285,4 ± (18,4)	276,9 ± (11,8)	1041,7 ± (37,6)	0,9980
	RB928064	224,5 ± (8,3)	248,5 ± (9,5)	901,7 ± (21,9)	0,9980
	RB855453	221,2 ± (12,8)	248,8 ± (13,8)	927,9 ± (33,5)	0,9961
Estresse leve	RB92579	57,4 ± (1,62)	—	577,6 ± (25,4)	0,9530
	RB867515	69,3 ± (1,98)	—	545,9 ± (29,8)	0,9546
	RB928064	76,0 ± (1,46)	—	527,0 ± (19,7)	0,9753
	RB855453	72,9 ± (1,28)	—	542,3 ± (17,6)	0,9800
Estresse moderado	RB92579	67,1 ± (1,85)	—	661,2 ± (22,3)	0,9693
	RB867515	88,1 ± (2,52)	—	669,3 ± (25,5)	0,9742
	RB928064	67,7 ± (1,57)	—	534,9 ± (23,5)	0,9653
	RB855453	65,3 ± (1,07)	—	503,4 ± (17,3)	0,9787
Estresse severo	RB92579	70,1 ± (1,73)	—	675,0 ± (19,7)	0,9774
	RB867515	81,5 ± (2,07)	—	646,7 ± (23,3)	0,9772
	RB928064	77,7 ± (1,55)	—	575,4 ± (19,2)	0,9790
	RB855453	79,9 ± (1,80)	—	596,4 ± (21,1)	0,9740

- NOTA: 1) Os parâmetros do modelo sigmoidal são significativos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t;
- 2) Os valores entre parênteses correspondem ao erro padrão de estimativa dos parâmetros;
- 3) O parâmetro "b" está relacionado com a taxa máxima de alongação relativa do colmo, que ocorre após a emergência. Assim, para os tratamentos com estresse hídrico leve, moderado e severo, iniciados após 60 DAP, este parâmetro foi estimado, para os respectivos cultivares, pelos valores apresentados nas linhas iniciais da presente tabela.

Assim, como apresentado na Figura 18 para a variável massa seca, obteve-se ajuste pelo modelo sigmoidal com três parâmetros para estatura do colmo, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 11. Oliveira et al. (2010) relataram ajuste a um modelo sigmoidal similar ao do presente trabalho para a variável altura das plantas, ao avaliarem o crescimento da parte aérea de cultivares de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco. Os autores observaram três fases de desenvolvimento distintas para esta variável, onde na

primeira, ocorrida do plantio aos 60 DAP, o crescimento foi lento e os valores médios observados foram de 18 cm. Na segunda fase, dos 60 aos 240 DAP, o desenvolvimento da planta foi rápido, com elevadas taxas de crescimento (22 mm d⁻¹). Já na terceira fase, os cultivares apresentaram ganhos médios de 49 cm, o que representou 15% da altura total do colmo.

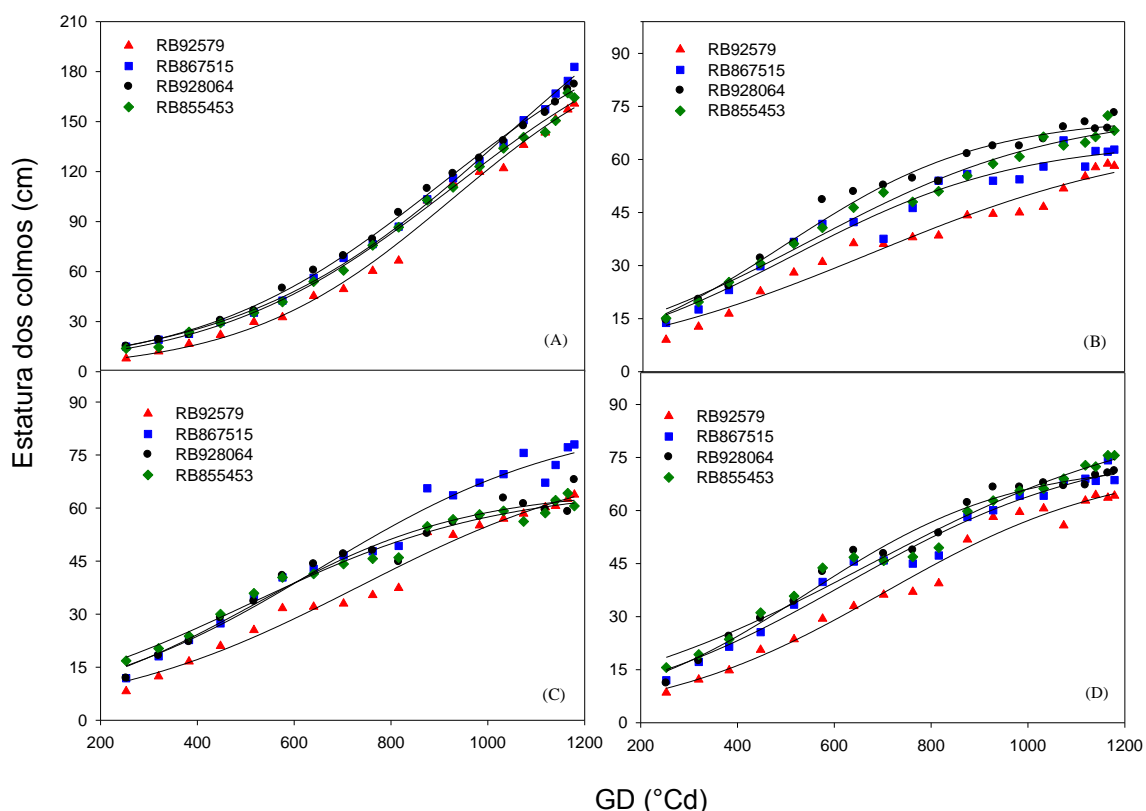


Figura 21 - Variação da estatura dos colmos de cultivares de cana-de-açúcar submetidos aos tratamentos com ausência de estresse hídrico (A), estresse leve (B), moderado (C) e severo (D), ao longo do período de formação, em função dos graus-dia acumulados após o plantio, utilizando a temperatura base de 16 °C.

5.2.3.2. Taxas de alongação do colmo e alongação relativa do colmo

Os valores de estatura do colmo apresentaram interação significativa entre os níveis de estresse hídrico e cultivares (Tabela 12). Os maiores valores de estatura do colmo dos cultivares ocorreram no tratamento sem estresse hídrico, como ilustrado na Figura 21. Ao final do experimento (157 DAP), os valores observados dessa variável foram, em ordem decrescente: 182,8

(RB867515), 172,4 (RB928064), 164,4 (RB855453) e 160,8 (RB92579) (Tabela13). Foi possível observar duas fases de desenvolvimento, sendo a primeira, do plantio até 550°Cd (60 DAP), caracterizada por crescimento lento, com valores da ordem de 29,0 (RB928064), 27,5 (RB867515), 26,5 (RB855453) e 20,0 cm (RB92579). Nessa fase, as cultivares apresentaram baixos valores de taxa de alongação do colmo (TEC) (Figura 23A), com valores médios próximos a 0,065 cm °Cd⁻¹ para os cultivares RB867516, RB928064 e RB855453 e 0,051 cm °Cd⁻¹ para o cultivar RB92579. A segunda fase de desenvolvimento, ocorrida a partir de 550 °Cd (60 DAP) foi caracterizada por crescimento rápido e linear. Os valores máximos de TEC observados nesse tratamento foram da ordem e 0,23 cm °Cd⁻¹ para os cultivares RB92579, RB928064 e RB855453, sendo constatada por volta dos 920 °Cd, enquanto que, para o cultivar RB867515, os valores máximos de TEC foram da ordem de 0,26 cm °Cd⁻¹ e ocorreram mais tarde (1040 °Cd), explicando assim sua maior estatura aos 157 DAP (Tabela 13).

Segundo Ramesh (2000), o crescimento da cultura em estatura é favorecido em condições de alta temperatura e disponibilidade de água. Portanto, o crescimento contínuo, caracterizado por altas taxas de alongação do colmo observadas no tratamento com ausência de estresse, pode ser explicado pelos elevados valores de temperatura no interior da casa-de-vegetação e pelas condições plenas de suprimento hídrico, sob as quais os cultivares foram submetidos ao longo do período experimental.

Nos demais tratamentos, denominados de estresse hídrico leve, moderado e severo (Figura 21, letras B, C e D), o crescimento foi afetado. Os valores médios observados aos 157 DAP estiveram compreendidos entre 58,2 (RB92579) e 78,0 (RB928064), 60,6 (RB855453) e 78,0 (RB867515) e entre 64,2 (RB92579) e 75,6 (RB855453), para os tratamentos referidos como estresse leve, moderado e severo, respectivamente. Em geral, o estresse hídrico causou reduções na estatura dos colmos de aproximadamente 60% em comparação ao tratamento sem estresse hídrico. Os efeitos negativos do estresse hídrico na estatura de plantas de cana-de-açúcar foram relatados por Silva et al. (2008), ao estudarem os componentes do rendimento de genótipos de cana-de-açúcar para a região do Texas, Estados Unidos. Os autores verificaram que a altura média dos colmos diminuiu de 192,69 para 167,48 cm,

sob as condições de ausência de estresse hídrico e estresse hídrico moderado, respectivamente. Os mesmos autores enfatizam a importância da seleção de cultivares que se revelem capazes de manter a alongação dos colmos sob as condições de estresse hídrico.

Tabela 12 – Resumo da análise de variância referente à estatura do colmo, aos 157 DAP, de quatro cultivares submetidos a quatro níveis de estresse hídrico

FV	Teste F	
	GL	MSP
Estresse	3	957,31 **
Cultivar	3	9,13 **
Estresse x cultivar	9	3,57 *
Resíduo	64	--
CV (%)		7,94

** Significativo a 1% de probabilidade; * Significativo a 5% de probabilidade

Tabela 13 - Valores médios da estatura dos colmos dos cultivares submetidos a diferentes níveis de estresse, aos 157 DAP

Cultivares	Estatura do colmo (cm)			
	Níveis de estresse			
	Ausência	Leve	Moderado	Severo
RB92579	160,8 Ab	58,2 Bb	63,8 Bb	64,2 Ba
RB867515	182,8 Aa	62,8 Cab	78,0 Ba	68,6 BCa
RB928064	172,4 Aa	78,0 Ba	68,0 Bab	71,2 Ba
RB855453	164,4 Ab	68,6 BCab	60,6 Cb	75,6 Ba

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

A Figura 22 ilustra as reduções da estatura dos colmos dos cultivares, causadas pela imposição do estresse hídrico. Observou-se que a deficiência hídrica promoveu reduções drásticas no tamanho e número de entrenós. Respostas similares foram observadas por Ramesh & Mahadevaswamy (2000). Machado et al. (2009), estudando os efeitos da deficiência hídrica na biometria de plantas de cana-de-açúcar, nas fases de crescimento inicial, máximo crescimento e de acúmulo de sacarose, verificaram que o comprimento dos entrenós foi menos afetado à medida que o estresse hídrico foi retardado.

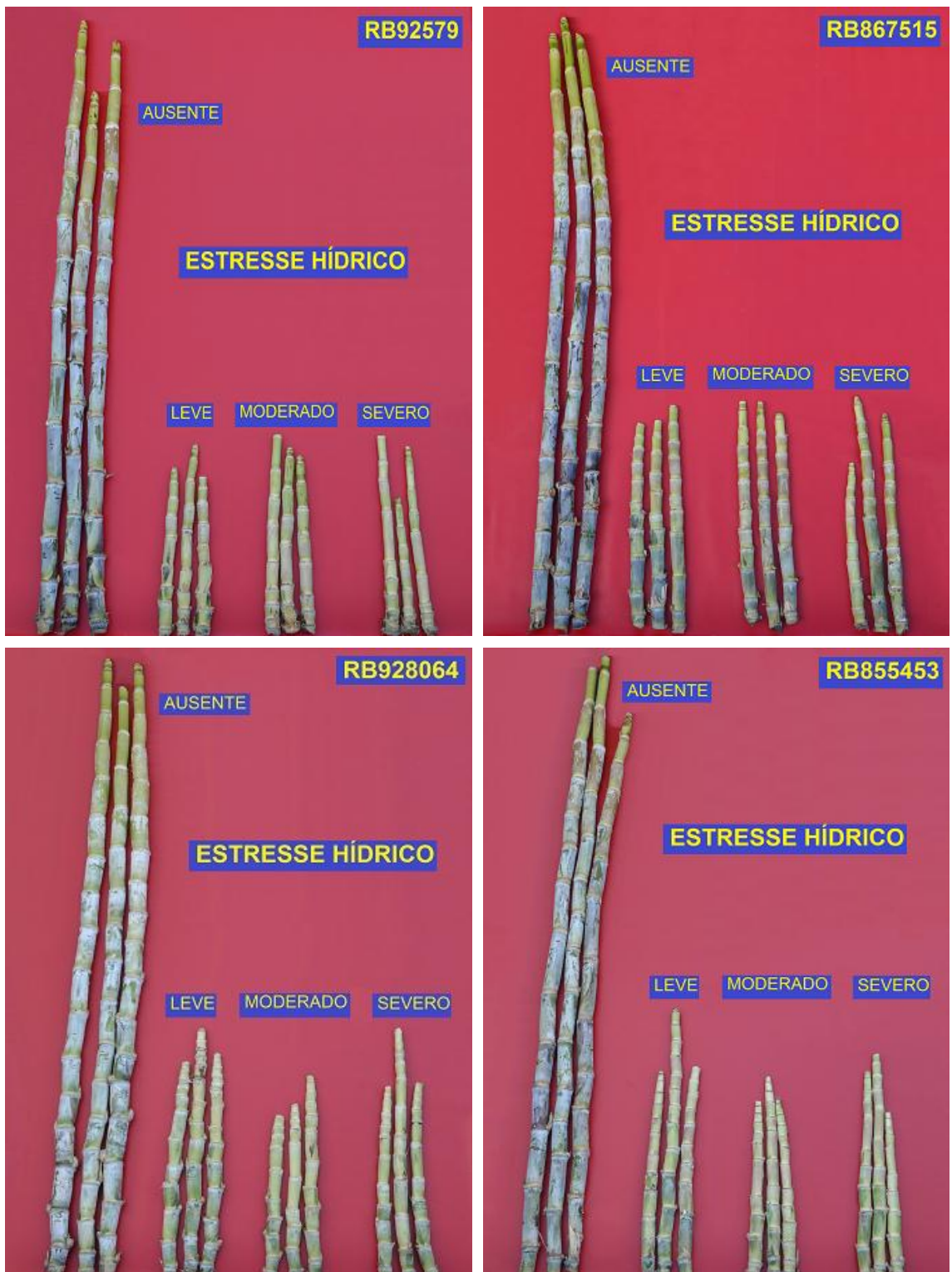


Figura 22 - Estatura dos colmos de cultivares de cana-de-açúcar, submetidos aos diferentes níveis de estresse hídrico nas condições de casa-de-vegetação, Viçosa-MG.

Os valores da taxa de alongação dos colmos (TEC) são apresentados na Figura 23. As reduções da TEC demonstradas pelos cultivares submetidos aos tratamentos com estresse hídrico foram superiores a 65% em comparação à TEC dos cultivares no tratamento com ausência de estresse.

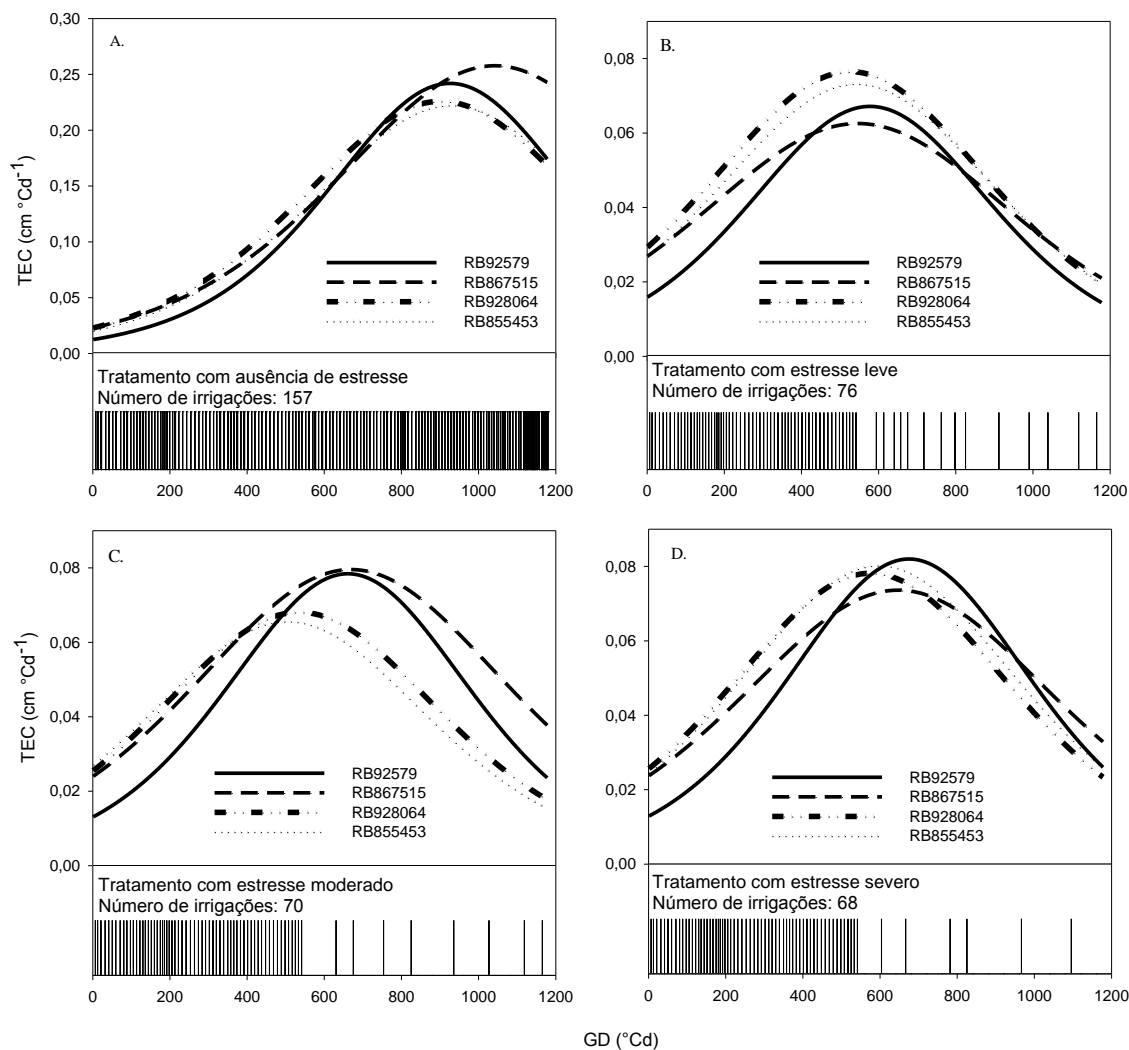


Figura 23 - Taxa de alongação do colmo (TEC) e número de irrigações aplicadas aos cultivares de cana-de-açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 16°C, Viçosa-MG.

No tratamento com estresse leve (Figura 23B), os valores máximos de TEC, em ordem decrescente, foram 0,0765 (RB928064), 0,0732 (RB855453), 0,0672 (RB92579) e 0,0625 $\text{cm } ^\circ\text{Cd}^{-1}$.

No tratamento referido como estresse moderado, nota-se pela Figura 23C que o cultivar RB92579 apresentou os menores valores iniciais de TEC, entretanto, em função da sua elevada taxa de alongação relativa do colmo (TCH) (Figura 24 C), apresentou valores de TEC superior ao do RB855453 e RB928064. Os cultivares RB92579 e RB867515 se destacaram em relação aos demais nas condições de estresse hídrico impostas pelo tratamento moderado, onde se verificou a TEC crescente até por volta dos 680 °Cd. Por outro lado, os cultivares RB855453 e RB928064 mostraram diminuições logo aos 530 °Cd. Ao final do período experimental, o cultivar RB867515 apresentou a maior TEC (0,0377 cm °Cd⁻¹), seguido pelo RB92579 (0,0236 cm °Cd⁻¹), RB928064 (0,0177 cm °Cd⁻¹) e RB855453 (0,0153 cm °Cd⁻¹).

Similarmente ao observado nos tratamentos com estresse leve e moderado, as plantas submetidas ao tratamento com estresse severo revelaram acentuadas quedas na TEC (Figura 22B). Mais uma vez, os cultivares RB92579 e RB867515 mostraram reduções mais tardias na TEC, cujos valores máximos foram de 0,082 e 0,073 cm °Cd⁻¹, respectivamente, ocorridos aos 660 °Cd. A TEC máxima dos cultivares RB928064 e RB855453 foram da ordem de 0,079 cm °Cd⁻¹, observada por volta dos 580 °Cd.

Inman-Bamber (2004), quando pesquisou os critérios para irrigação na cultura da cana-de-açúcar, observou que a taxa de alongação do colmo variou de acordo com a disponibilidade de água. Inman-Bamber & Smith (2005), estudando as relações de água na cultura da cana-de-açúcar, verificaram que a taxa de alongação do colmo foi altamente sensível ao estresse hídrico. Segundo os autores, este é um parâmetro que pode ser utilizado como critério no manejo da irrigação na cana-de-açúcar.

No que diz respeito às taxas de alongação relativa do colmo (TCH) (Figura 24), os valores do tratamento com ausência de estresse foram altos e praticamente não variaram até 700 °Cd. A partir desse momento, ocorreram reduções graduais até o final do período experimental (1170 °Cd), quando os cultivares apresentaram valores em torno de 0,0014 cm cm⁻¹ °Cd⁻¹.

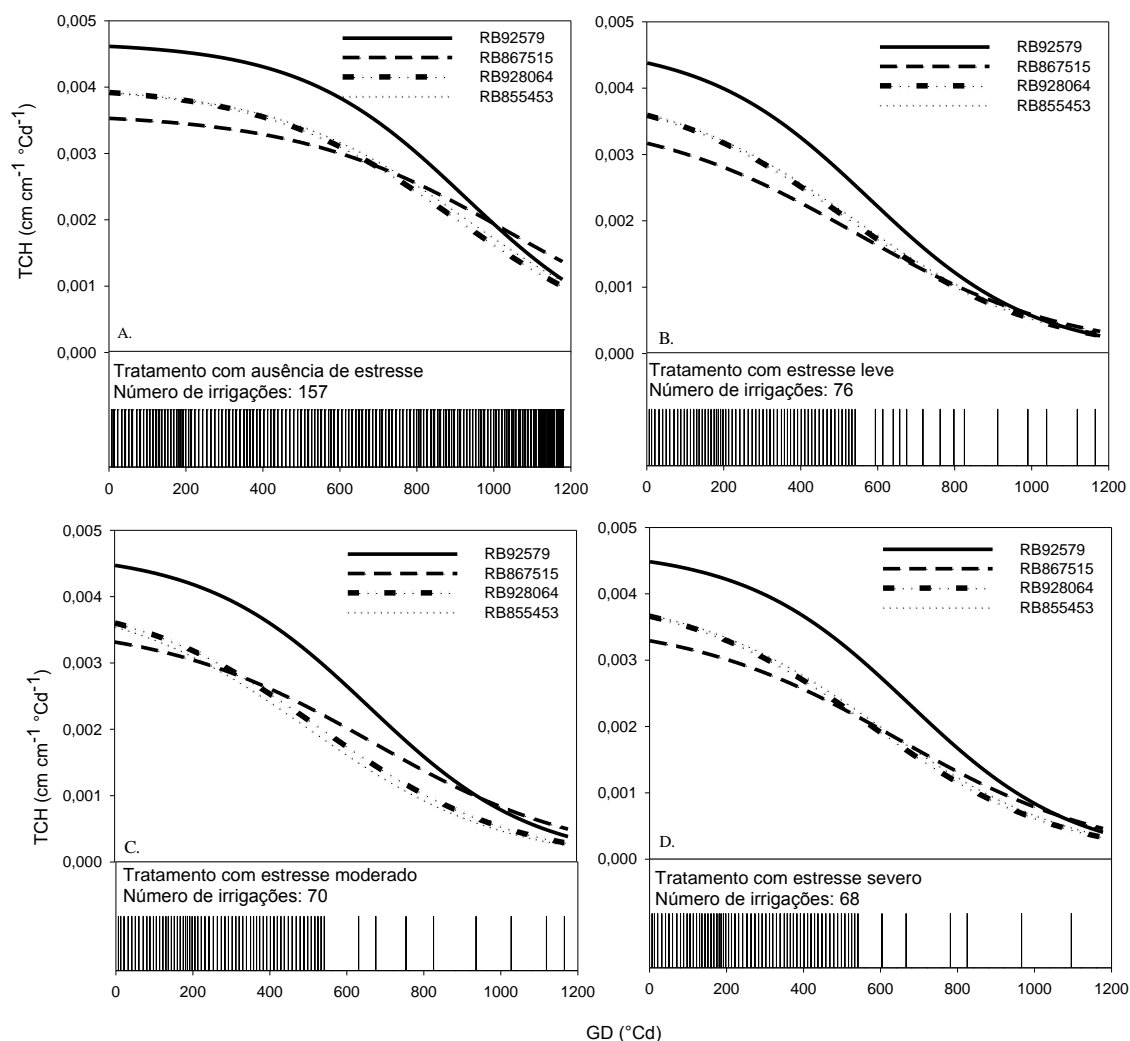


Figura 24 - Taxa de alongação relativa do colmo (TCH) e número de irrigações aplicadas aos cultivares de cana de açúcar, submetidos aos tratamentos com ausência de estresse (A), estresse leve (B), estresse moderado (C) e estresse severo (D), em função dos graus-dia acumulados após o plantio (GD), utilizando a temperatura base de 16°C, Viçosa-MG.

Nos tratamentos com estresse hídrico, o decréscimo da disponibilidade de água promoveu reduções acentuadas na taxa de alongação relativa do colmo (Figura 24). Sob ausência de estresse hídrico, a TCH dos quatro cultivares avaliados esteve próxima de $0,0025 \text{ cm cm}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{Cd}^{-1}$ aos 800 °Cd. Em contraste, para o mesmo tempo térmico, os valores de TCH, referentes, respectivamente, aos tratamentos com estresse leve, moderado e severo foram da ordem de 0,0010, 0,0011 e $0,0012 \text{ cm cm}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{Cd}^{-1}$. Aos 157 DAP (1170 °Cd), o crescimento vertical dos cultivares submetidos aos tratamentos com estresse hídrico praticamente foi inexistente.

Em todos os tratamentos avaliados, constatou-se que os valores iniciais da TEC foram inferiores para o RB92579, em comparação aos demais cultivares (Figura 23). Entretanto, em decorrência dos maiores valores iniciais de TCH dessa cultivar (Figura 24), os valores de TEC se igualaram à TEC dos demais cultivares, chegando, até mesmo, a ultrapassar estes, como foi o caso do tratamento severo (Figura 23D).

6. CONCLUSÕES

No experimento de campo, a análise de regressão mostrou que os modelos exponencial, logístico e Gompertz estimaram de forma satisfatória a variação do acúmulo de massa seca da parte aérea durante a fase de formação da cana-de-açúcar.

Dentre os modelos estudados, o que teve o melhor desempenho foi o exponencial, que apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação ajustados.

O modelo de Gompertz apresentou tendência de superestimar os valores iniciais de massa seca acumulada pelos cultivares, o que provavelmente afetou a estimativa do parâmetro r . Os valores do parâmetro r estimados pelo modelo de Gompertz foram, em média, 8 e 19% superiores aos estimados pelos modelos exponencial e logístico, respectivamente.

Nas condições ambientais em que foi conduzido o experimento, os cultivares RB855453 e RB867515 mostraram-se mais produtivos que os demais.

No segundo experimento, em decorrência do efeito do estresse hídrico nas taxas de crescimento da cana-de-açúcar sob condições de casa-de-vegetação, foi constatado que o modelo sigmoidal com três parâmetros proporcionou melhor ajuste aos dados de matéria seca e de altura das plantas.

Períodos intermitentes de estresse hídrico, cujo limite superior de tensão de água no substrato é de 60 kPa, promovem severos danos morfofisiológicos às plantas de cana-de-açúcar.

Sob ausência de estresse hídrico, o crescimento e o acúmulo da fitomassa são contínuos durante a fase de formação, caracterizada por altas taxas de crescimento absoluto e relativo da cultura.

O estresse hídrico altera o acúmulo de fitomassa e o crescimento vertical dos colmos, antecipando a ocorrência de quedas nas taxas de crescimento absoluto da cultura e taxa de alongação do colmo.

O cultivar RB867515 mostrou-se mais eficiente em acumular biomassa e manter o crescimento vertical dos colmos, em condições de estresse hídrico, pois conseguiu manter o acúmulo de fitomassa e a alongação dos colmos a taxas crescentes por mais tempo que os demais quando submetidos a essas condições.

O cultivar RB928064 mostrou-se mais sensível ao estresse hídrico que os demais, pois suas reduções na taxa de crescimento absoluto da cultura ocorreram mais rapidamente, após a imposição dos tratamentos com estresse hídrico.

Embora o cultivar RB855453 tenha apresentado boa produção de matéria seca da parte aérea nos tratamentos com estresse, apresentou reduções mais rápidas na taxa de alongação dos colmos em comparação aos cultivares RB867515 e RB92579.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, 1998. 328p. (Irrigation and drainage paper, 56).

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; FILHO, G. M.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, set./out., 2008.

ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999, 322 p.

ANDRADE NETO, R.C.; MIRANDA, N.O.; DUDA, G.P.; GÓES, G.B.; LIMA, A.S. Crescimento e produtividade do sorgo forrageiro BR 601 sob adubação verde. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, V.14, n.2, p.124-130, 2010.

ATTEYA, A. M. **Alteration of water relations and yield of corn genotypes in response to drought stress**. Bulgarian Journal of Plant Physiology, v.29, p.63-76, 2003.

BARBOSA, G. V. S. (coord.). Três novas variedades RB de cana-de-açúcar. Universidade Federal de Alagoas, **Boletim técnico PMGCA**, n2, 2003.

BARBOSA, M. H. P.; SILVEIRA, L. C. I.; SOUZA, V. F. M.; RIBEIRO, S. N. N. Cultivar release: RB928064- Sugarcane cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** n.4, p.356-359, 2004.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988.44p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. **Projeções do agronegócio 2009/2010 a 2019/2020**, Brasília, fevereiro de 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. 13 set. 2012.

CARLIN, S. D.; SANTOS, D. M. M. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.44, n.9, p.1106-1113, set. 2009.

CARLIN, S. D.; SILVA, M. A.; ROSSETO, R. Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. *Bragantia*, Campinas, v.67, n.4, p.845-853, 2008.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. **Melhoramento da cana-de-açúcar**. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF. 2004.

CHAVES, M. M. Effects of Water Deficits on Carbon Assimilation. *Journal of Experimental Botany*, v.42, n. 234, p.1-16, January 1991.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, v.103, p.551-560, 2009.

CONAB- Companhia nacional de abastecimento. Cana-de-açúcar: Safra 2011/2012 - terceiro levantamento. Brasília, 2012. <http://www.conab.gov.br>. 13 set. 2012.

CONFALONE, A. E.; BERNARDES, M. S.; COSTA, L. C.; RIGHI, C. A.; NETO, D. D.; MARTIN, T. N.; MANFRON, P. A.; PEREIRA, C. R. Expolinear model on soybean growth in Argentina and Brazil. *Ciência Rural, Santa Maria*, v.40, n.5, p.1009-1016, maio, 2010.

COSTA, C. T. S.; FERREIRA, V. M.; ENDRES, L.; FERREIRA, D. T. R. G.; GONÇALVES, E. R. Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de-açúcar no quarto ciclo de cultivo. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 24, n. 3, p. 56-63, jul.-set., 2011.

COSTA, L. C.; FERREIRA, E. A.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C.; CECON, P. R. Uso da função expolinear para análise do crescimento da cultura da soja em diferentes condições de disponibilidade de água no solo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.7, n.2, p. 1-4, 1999.

ENDRES, L.; SILVA, J. V.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S. Photosynthesis and Water Relations in Brazilian Sugarcane. *The Open Agriculture Journal*, v.4, p.31-37, 2010.

FAO. The State of Food and Agriculture. Part I. Biofuels: Prospects, risks and opportunities. **FAO Agriculture Series n° 39**. FAO, Rome; 2008.

FRANCIS, C. A.; RUTGER, J. N.; PALMER, A. F. E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L). *Crop Science*, v.9, p.537-539, 1969.

GALMÉS, J.; RIBAS-CARBÓ, M.; MEDRANO, H.; FLEXAS, J. Rubisco activity in Mediterranean species is regulated by the chloroplastic CO₂ concentration under water stress. *Journal of Experimental Botany*, v.62, n.2, p. 653-665, 2011.

GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, nov. 2001.

GONÇALVES, E. R.; FERREIRA, V. M.; SILVA, J. V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T. P.; DUARTE, W. G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.14, n.4, p.378-386, 2010.

GOUDRIAAN, J.; MONTEITH, J.L. A mathematical function for crop growth based on and leaf area expansion. **Annals of Botany**, v.66, p.695-701, 1990.

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

INMAN-BAMBER, N. G.; JAGER, J. M. Effect of water stress on growth, leaf resistance and canopy temperature in field grown sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**, June 1986.

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

KORNDÖRFER, G. H.; RIBEIRO, A. C.; ANDRADE, L. A. B. Cana-de-açúcar. In: RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999, 322p.

LAWLOR, D. W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, Cell and Environment**, v.25, p.275-294, 2002.

LYRA G. B.; BATISTA, E. L. S.; LYRA, G. B.; PEREIRA, C. R.; SILVA, L. D. B.; SILVA, G. M. Coeficiente da cultura da cana-de-açúcar no estágio inicial de desenvolvimento em Campos dos Goytacazes, RJ. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 1, p. 102-113, janeiro-março, 2012.

LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; MOURA FILHO, G. Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR 106, em três épocas de plantio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.7, n.3, p. 211-230, 2008.

LYRA, G. B.; ZOLNIER, S.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; SEDIYAMA, M. A. N. Modelos de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.1, p.69-77, 2003.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.12, p.1575-1582, dez. 2009.

MATSUOKA, S.; ARIZONO, H.; BASSINELLO, A. I.; GHELLER, A. C. A.; HOFFMANN, H. P.; MASUDA, Y. Variedades superprecoces da cana-de-açúcar. **Álcool e açúcar**, n.78, p. 22-30, 1995.

MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop Modelling. **Agronomy Journal**, v.88, p.695-697, 1996.

MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; SOARES, J. M.; CARMO, J. F. A.; BRANDÃO, E. O. Modelos de crescimento para o feijão-caupi e o milho, sob sistemas de plantio exclusivo e consorciado, no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, n. 3, p.275-284, dezembro/2008

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C.; NETO, D. E. S.; ROCHA, A. T., CARVALHO, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.46, n.6, p.617-625, jun. 2011a.

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; JÚNIOR, M. A. L.; MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.14, n.9, p.951–960, 2010.

OLIVEIRA, F. M.; ASPIAZÚ, I.; KONDO, M. K.; BORGES, I. D.; PEGORARO, R. F.; VIANNA, E. J. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 1, p. 56, 2011b.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O. T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agrária**, v.6, n.1-2, p.85-89, 2005.

PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais**, 2002, 305p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Edur, 2004. 191p.

PMGCA- Programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar. Disponível em <www.canaufv.com.br>. Acesso em maio de 2012.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **J. Agronomy & Crop Science**. Berlim, v.185, p.83-89, 2000.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of Formative Phase Drought on Different Classes of Shoots Shoot Mortality Cane Attributes Yield and Quality of Four Sugarcane Cultivars. **Journal Agronomy & Crop Science**, Berlin, v.185, p.249-258, 2000.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999, 322p.

ROBERTSON, M. J.; WOOD, A. W.; MUCHOW, R. C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, v.48, p.11-25, 1996.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu, São Paulo: 1995. 99 p.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.2, n.3, p.287-294, 1998.

SANTOS, V. R.; FILHO, G. M.; ALBUQUERQUE, A. W.; COSTA, J. P. V.; SANTOS, C. G.; SANTOS, A. C. I. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n.4, p.389-396, 2009.

SILVA, M. A.; SILVA, J. A. G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agrícola**, v.65, n.6, p.620-627, 2008b.

SILVA, M. A.; SOARES, R. A. B.; LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.3, p.655-661, 2008a.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; CARMO, J. F. A.; SOUZA, L. S. B.; Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submédio do vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 500-509, jul-set, 2012.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; GOMES JÚNIOR, W, F. Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p.1257-1265, 2011.

SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; GROSSI, J. A. S.; BARBOSA, J. G.; MOURA, C. R. W.; MUNIZ, A. M. Crescimento do girassol ornamental cultivado em ambiente protegido sob diferentes níveis de condutividade elétrica de fertirrigação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n.5, p. 602-610, set/out, 2009.

SIMÕES, M. S.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. C. Growth índices and productivity in sugarcane. **Scientia Agricola**, (Piracicaba, Braz.), v.62, n.1, p.23-30, Jan./Feb. 2005.

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.

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

SOUZA, E. L.; MACEDO, I. C. (Org.) **Etanol e Bioeletricidade: A Cana-de-Açúcar no Futuro da Matriz Energética**. São Paulo-SP. Unica, 2009.

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

TEI, F.; AIKMAN, D. P.; SCAIFE, A. Growth of lettuce, onion and red beet.2. Growth Modeling. *Annals of Botany*, London, v.78, n.5, p.645-652, 1996.

TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, v.102, p.64–72, 2007.

VAN DILLEWIJN, C., 1952: *Botany of Sugarcane*. The Chronica Botânica Co., Waltham, MA.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, special issue, p.187-206, 2003.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C. Sugarcane Response to Water-Deficit Stress during Early Growth on Organic and Sand Soils. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v.5, p.403-414, 2010.

APÊNDICE

```
//-----  
  
#include <vcl.h>  
#pragma hdrstop  
#include "Unit1.h"  
#include <math>  
//-----  
  
#pragma package(smart_init)  
#pragma resource "*.dfm"  
TForm1 *Form1;  
//-----  
  
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)  
    : TForm(Owner)  
{  
}  
//-----  
  
//Biblioteca incluída  
#include<dos.h>  
  
AnsiString comando, ss, nn, dd, nn_old, dd_old;  
int x=0, x_dia=0;  
  
//Variáveis externas  
TDateTime TempoData;  
AnsiString NomeArquivo, arquivo="iniciar";  
int Canal;  
double Leitura_03[8],U_Rg, R_Rg, i_Rg, Rg, I_Rg_padrao,U_PAR, R_PAR, i_PAR, PAR,  
U_PAR_cv,  
R_PAR_cv, i_PAR_cv, PAR_cv;  
double Leitura_05[8],U_Tc, R_Tc, i_Tc,U_VV, R_VV, i_VV, Ta_1, Tc ,UR_1, VV, Ta_2, UR_2;  
double Leitura_07[8], U_US, R_US, i_US, US;  
double Leitura_09[8],Ta_cv, Rg_cv,U_Rg_cv, R_Rg_cv, i_Rg_cv, VV_cv, UR_cv,U_VV_cv,  
R_VV_cv, i_VV_cv;
```

```

double Leitura_CJC;
double dado_limpo_float;
unsigned char dado[8];
unsigned char dado_limpo[]="00000000";
int c=0, dt=10; double pulsos=0, Tensao_Agua_Solo;
int Estado_Control=1;
int Logica_Total=0;
int Logica_Sem_Estresse=0;
int Logica_Estresse_Leve=0;
int Logica_Estresse_Moderado=0;
int Logica_Estresse_Severo=0;

float Tensao_Sem_Estresse;
float Tensao_Estresse_Leve;
float Tensao_Estresse_Moderado;
float Tensao_Estresse_Severo;

int Tempo_Irigacao_Sem_Estresse=0;
int Tempo_Irigacao_Estresse_Leve=0;
int Tempo_Irigacao_Estresse_Moderado=0;
int Tempo_Irigacao_Estresse_Severo=0;

int Irrigacao_Sem_Estresse=0;
int Irrigacao_Estresse_Leve=0;
int Irrigacao_Estresse_Moderado=0;
int Irrigacao_Estresse_Severo=0;

int Numero_Irigacoes_Sem_Estresse=0;
int Numero_Irigacoes_Estresse_Leve=0;
int Numero_Irigacoes_Estresse_Moderado=0;
int Numero_Irigacoes_Estresse_Severo=0;

int valor_15, valor_13, valor_12, valor_10, valor_11, x_15, x_13, x_12, x_10, x_11;
double pulsos_15=0, pulsos_13=0, pulsos_12=0, pulsos_10=0, pulsos_11=0;
float frequencia_15, frequencia_13, frequencia_12, frequencia_10, frequencia_11, R_15,
R_13,
R_12, R_10, R_11, R21_15, R21_13, R21_12, R21_10, T_11, t_11, dT;
//-----

//Código Necessário para Entrada/Saída de Dados no Windows XP
//O arquivo INPOUT32.DLL precisa estar na mesma pasta do executável do Builder C++
//Declaração dos ponteiros para função.
typedef short _stdcall (*PtrInp)(short EndPorta);
typedef void _stdcall (*PtrOut)(short EndPorta, short datum);

HINSTANCE hLib; //Instância para a DLL inpout32.dll.

```

```

PtrInp inportB; //Instância para a função Imp32().
PtrOut outportB; //Instância para a função Out32().
//-----

void __fastcall TForm1::FormCreate(TObject *Sender)
{
    //Carrega a DLL na memória.
    hLib = LoadLibrary("inpout32.dll");

    if(hLib == NULL)
    {
        ShowMessage("Erro. O arquivo inpout32.DLL não foi encontrado.");
        Application->Terminate();
    }

    //Obtém o endereço da função Inp32 contida na DLL.
    inportB = (PtrInp) GetProcAddress(hLib, "Inp32");
    if(inportB == NULL)
    {
        ShowMessage("Erro. Erro ao endereçar a função Inp32.");
        Application->Terminate();
    }

    //Obtém o endereço da função Out32 contida na DLL.
    outportB = (PtrOut) GetProcAddress(hLib, "Out32");
    if(outportB == NULL)
    {
        ShowMessage("Erro. Erro ao endereçar a função Out32.");
        Application->Terminate();
    }
}
//-----

void __fastcall TForm1::FormCloseQuery(TObject *Sender, bool &CanClose)
{
    FreeLibrary(hLib); //Libera memória alocada pela DLL.
}
//-----

#define LEN_BUFFER 100 //Tamanho do Buffer.
//Variáveis da API
HANDLE hCom;
DCB dcb;
//-----

```

```
bool GLBEnviaDados = false; //Para habilitar/desabilitar o envio de dados pela serial.
String StrComandos; //Armazena a string de comando lida da Serial.
char BufferRecebe[LEN_BUFFER]; //Buffer temporário para trabalhar direto com ReadFile().
```

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

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

```
//CONFIGURA PORTA SERIAL.
bool ConfiguraControle(void)
{
    if(!GetCommState(hCom, &dcb))
    {
        return false;
    }
    dcb.BaudRate = CBR_9600;
    dcb.ByteSize = 8;
    dcb.Parity = NOPARITY;
    dcb.StopBits = ONESTOPBIT;

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

```

void Modulo_7018(AnsiString End_Mod, AnsiString z, int Habilita_CJC)
{
    AnsiString comando;
    unsigned char caracter[2];
    int i, x, y=0;
    unsigned char caracter_int;

    AbrirPorta("COM1"); //Abre Porta Serial COM1
    ConfiguraControle(); //Configura Porta Serial

    outportB(0x000003f9, 0x00000000); //Importante para não travar

    if(Habilita_CJC==0) //Leitura dos Canais Disponíveis no Módulo
    {
        comando = "#"+End_Mod+z;
    }

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

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

    while((inportB(0x000003fd) & 0x00000020) == 0);
    outportB(0x000003f8, 0x0000000D); //Indica término do comando

    dado[1]= '\0';
    caracter[1]= '\0';

    i=1;
    do
    {
        while((inportB(0x000003fd) & 0x00000001) == 0);

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

```

```

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

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

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

        dado_limpo[y]=dado[x];
        y=y+1;
    }
}
dado_limpo_float = atof(dado_limpo);
}
//-----

void Pulsos_Sensor_Umididade_Temperatura(void)
{
    do
    {
        TempoData = Now();
        ss = TempoData.FormatString("ss"); //Segundo atual

        valor_15=inportB(0x379); //Leitura de todos os pinos desse endereço
        valor_13=inportB(0x379);
        valor_12=inportB(0x379);
        valor_10=inportB(0x379);
        valor_11=inportB(0x379);
    }
}

```

```

valor_15=valor_15 & 0x08;
valor_13=valor_13 & 0x10;
valor_12=valor_12 & 0x20;
valor_10=valor_10 & 0x40;
valor_11=valor_11 & 0x80;

if (valor_15==8)
{
x_15=1;
}

if (valor_15==0 && x_15==1)
{
pulsos_15=pulsos_15+1;
x_15=0;
}
//-----

if (valor_13==16)
{
x_13=1;
}

if (valor_13==0 && x_13==1)
{
pulsos_13=pulsos_13+1;
x_13=0;
}
//-----

if (valor_12==32)
{
x_12=1;
}

if (valor_12==0 && x_12==1)
{
pulsos_12=pulsos_12+1;
x_12=0;
}

//-----

if (valor_10==64)
{
x_10=1;
}

```

```

}

if (valor_10==0 && x_10==1)
{
pulsos_10=pulsos_10+1;
x_10=0;
}
//-----

if (valor_11==128)
{
x_11=1;
}

if (valor_11==0 && x_11==1)
{
pulsos_11=pulsos_11+1;
x_11=0;
}
}while(ss!=dt);
}
//-----

void Temperatura_Umididade_Substrato(void)
{
//Equação do termistor
frequencia_11=pulsos_11/(float)dt; //em Hz
pulsos_11=0;

R_11=(5818.33-frequencia_11)/(0.002313*frequencia_11+0.003007);
T_11=3975/((log(R_11/10000)+3975/298.16));
t_11=T_11-273.16;

// Equação de dT
//dT=21-t_11;
dT=0;

//Equação tratamento sem estresse
frequencia_15=pulsos_15/(float)dt; //em Hz
pulsos_15=0;

R_15=(5818.33-frequencia_15)/(0.002313*frequencia_15+0.003007);
R21_15=(R_15/(1-(0.018*dT)))/1000;
Tensao_Sem_Estresse = (4.093+(3.213*R21_15))/(1-(0.009733*R21_15)-(0.01205*t_11));

//Equação do tratamento estresse leve

```

```

frequencia_13=pulsos_13/(float)dt; //em Hz
pulsos_13=0;

R_13=(5818.33-frequencia_13)/(0.002313*frequencia_13+0.003007);
R21_13=(R_13/(1-(0.018*dT)))/1000;
Tensao_Estresse_Leve=(4.093+(3.213*R21_13))/(1-(0.009733*R21_13)-(0.01205*t_11));

//Equação do tratamento estresse moderado
frequencia_12=pulsos_12/(float)dt; //em Hz
pulsos_12=0;

R_12=(5818.33-frequencia_12)/(0.002313*frequencia_12+0.003007);
R21_12=(R_12/(1-(0.018*dT)))/1000;
Tensao_Estresse_Moderado=(4.093+(3.213*R21_12))/(1-(0.009733*R21_12)-(0.01205*t_11));

//Equação do tratamento estresse severo
frequencia_10=pulsos_10/(float)dt; //em Hz
pulsos_10=0;

R_10=(5818.33-frequencia_10)/(0.002313*frequencia_10+0.003007);
R21_10=(R_10/(1-(0.018*dT)))/1000;
Tensao_Estresse_Severo=(4.093+(3.213*R21_10))/(1-(0.009733*R21_10)-(0.01205*t_11));
}
//-----

void Controle_Reles (void) // Porta Paralela
{
if(Estado_Control==0)
{
if(Tensao_Sem_Estresse > 10 && Irrigacao_Sem_Estresse==0 &&
Tempo_Irrigacao_Sem_Estresse
< 3 && frequencia_15 >85)
{
Logica_Sem_Estresse=1;
Tempo_Irrigacao_Sem_Estresse = Tempo_Irrigacao_Sem_Estresse + 1;
Form1->Shape1->Brush->Color = clRed;
}
}

if(Tempo_Irrigacao_Sem_Estresse==(2+1)) //irrigação com 2 min
{
Irrigacao_Sem_Estresse=1;
Logica_Sem_Estresse=0;
Tempo_Irrigacao_Sem_Estresse = 0;
Form1->Shape1->Brush->Color = clWhite;
}
}

```

```

Numero_Irigacoes_Sem_Estresse=Numero_Irigacoes_Sem_Estresse+1;
}

if(Tensao_Estresse_Leve > 60 && Irrigacao_Estresse_Leve==0 &&
Tempo_Irigacao_Estresse_Leve < 3 && frequencia_13 >85)
{
Logica_Estresse_Leve=2;
Tempo_Irigacao_Estresse_Leve = Tempo_Irigacao_Estresse_Leve + 1;
Form1->Shape2->Brush->Color = clRed;
}

if(Tempo_Irigacao_Estresse_Leve==(2+1)) //irrigação com 2 min
{
Irigacao_Estresse_Leve=1;
Logica_Estresse_Leve=0;
Tempo_Irigacao_Estresse_Leve = 0;
Form1->Shape2->Brush->Color = clWhite;
Numero_Irigacoes_Estresse_Leve=Numero_Irigacoes_Estresse_Leve+1;
}

if(Tensao_Estresse_Moderado > 90 && Irrigacao_Estresse_Moderado==0 &&
Tempo_Irigacao_Estresse_Moderado < 3 && frequencia_12 >85)
{
Logica_Estresse_Moderado=4;
Tempo_Irigacao_Estresse_Moderado = Tempo_Irigacao_Estresse_Moderado + 1;
Form1->Shape3->Brush->Color = clRed;
}

if(Tempo_Irigacao_Estresse_Moderado==(2+1)) //irrigação com 2 min
{
Irigacao_Estresse_Moderado=1;
Logica_Estresse_Moderado=0;
Tempo_Irigacao_Estresse_Moderado = 0;
Form1->Shape3->Brush->Color = clWhite;
Numero_Irigacoes_Estresse_Moderado=Numero_Irigacoes_Estresse_Moderado+1;
}

if(Tensao_Estresse_Severo > 120 && Irrigacao_Estresse_Severo==0 &&
Tempo_Irigacao_Estresse_Severo < 3 && frequencia_10 >85)
{
Logica_Estresse_Severo=8;
Tempo_Irigacao_Estresse_Severo = Tempo_Irigacao_Estresse_Severo + 1;
Form1->Shape4->Brush->Color = clRed;
}

```

```

if(Tempo_Irrigacao_Estresse_Severo==(2+1)) //irrigação com 2 min)
{
    Irrigacao_Estresse_Severo=1;
    Logica_Estresse_Severo=0;
    Tempo_Irrigacao_Estresse_Severo = 0;
    Form1->Shape4->Brush->Color = clWhite;
    Numero_Irrigacoes_Estresse_Severo=Numero_Irrigacoes_Estresse_Severo+1;
}
}

Logica_Total = Logica_Sem_Estresse + Logica_Estresse_Leve + Logica_Estresse_Moderado
+
Logica_Estresse_Severo;
outportB(0x378, Logica_Total);
}
//-----

void Modulos_Seriais(void)
{
    AnsiString z;

Módulo 7018 Nº 03 - Sinal baixo na ordem de mV (+/- 50 mV)
for(Canal=0; Canal<8; Canal++)
{switch (Canal)
{case 0: z=0;break;
case 1: z=1;break;
case 2: z=2;break;
case 3: z=3;break;
case 4: z=4;break;
case 5: z=5;break;
case 6: z=6;break;
case 7: z=7;break;
}

Modulo_7018("03",z,0); //Terceiro parâmetro = 0 (leitura dos termopares)
Leitura_03[Canal] = dado_limpo_float;
}

Módulo 7018 Nº 05 - Sinal alto na ordem de V (+/- 2,5V)
for(Canal=0; Canal<8; Canal++)
{switch (Canal)
{case 0: z=0;break;
case 1: z=1;break;
case 2: z=2;break;
case 3: z=3;break;
case 4: z=4;break;
case 5: z=5;break;
}
}

```

```

    case 6: z=6;break;
    case 7: z=7;break;
}
//Modulo_7018("05",z,0); //Terceiro parâmetro = 0 (leitura dos termopares)
Leitura_05[Canal] = dado_limpo_float;
}

// Módulo 7018 Nº 01 - Sinal alto na ordem de V (+/- 5V) Torre 2
for(Canal=0; Canal<8; Canal++)
{switch (Canal)
{case 0: z=0;break;
case 1: z=1;break;
case 2: z=2;break;
case 3: z=3;break;
case 4: z=4;break;
case 5: z=5;break;
case 6: z=6;break;
case 7: z=7;break;
}
//Modulo_7018("07",z,0); //Módulo 7018 Torre 2
Leitura_07[Canal] = dado_limpo_float;
}

// Módulo 7018 Nº 09 - sinal alto na ordem de V (+/- 2,5V)
for(Canal=0; Canal<8; Canal++)
{switch (Canal)
{case 0: z=0;break;
case 1: z=1;break;
case 2: z=2;break;
case 3: z=3;break;
case 4: z=4;break;
case 5: z=5;break;
case 6: z=6;break;
case 7: z=7;break;
}
Modulo_7018(14,z,0); //terceiro parâmetro = 0 (leitura dos termopares) casa de vegetação
Leitura_09[Canal] = dado_limpo_float;
}
}
//-----

void Equacoes_Sensores(void)
{
// Medições de campo Torre 1
// Sensor de radiação global, Piranômetro LI-COR LI-200SA
U_Rg = Leitura_03[0]*1000;

```

```

R_Rg = 147;
i_Rg = U_Rg/R_Rg;
Rg =(i_Rg*1000)/87.0;
Rg=500;
I_Rg_padrao = I_Rg_padrao + Rg*60/1000;

//Sensor Quântico de radiação PAR, LI-190SA
U_PAR = Leitura_03[1]*1000;
R_PAR = 604.0;
i_PAR = U_PAR/R_PAR;
PAR =(i_PAR*1000)/7.22;

//Sensor de temperatura do ar e umidade relativa, Vaisala HMP50 Ta_1 =-
40+100*Leitura_05[0];
UR_1 =100*Leitura_05[1];

//Sensor de infravermelho para medição da temperatura do dossel
//Everest 4000.4GL
U_Tc = Leitura_05[2];
R_Tc = 100.61;
i_Tc = 1000*(U_Tc/R_Tc);
Tc = (8.75*i_Tc) - 75;

//Sensor de velocidade do vento, Lambrecht 1453 S2
U_VV = Leitura_05[3];
R_VV= 2206.8;
i_VV= 1000*(U_VV/R_VV); //i_VV em mA
VV= i_VV*35; // m/s
//Sensor de umidade do solo, waterscout 100
U_US = Leitura_05[4];
//-----

Medições Campo Torre 2
//Sensor de temperatura do ar e umidade relativa, Vaisala HMP50
Ta_2 =-40+100*Leitura_07[0];
UR_2 =100*Leitura_07[1];
//-----

Medições interior da casa de vegetação
// Sensor de radiação global, Piranometro LI-COR LI-200SA
U_Rg_cv = Leitura_09[0]*1000;
R_Rg_cv = 147;
i_Rg_cv = U_Rg/R_Rg;
Rg_cv =(i_Rg*1000)/92.6;

```

```
Rg=500;
I_Rg_padrao = I_Rg_padrao + Rg*60/1000;
```

```
Sensor Quântico de radiação PAR, LI-190SA
```

```
U_PAR_cv = Leitura_09[1]*1000;
R_PAR_cv = 604.0;
i_PAR_cv = U_PAR_cv/R_PAR_cv;
PAR_cv =(i_PAR_cv*1000)/7.22;
```

```
//Sensor de temperatura do ar e umidade relativa, Vaisala HMP50
```

```
Ta_cv =-40+100*Leitura_09[0];
UR_cv =100*Leitura_09[1];
```

```
//Sensor de velocidade do vento, Lambrecht FMA 903-I
```

```
i_VV_cv = Leitura_09[2];
R_VV_cv= 100;
U_VV_cv= 1000*(i_VV_cv/R_VV_cv);
VV_cv= -1.27+0.3175*U_VV_cv; // m/s
}
//-----
```

```
void Verifica_Arquivo(void)
```

```
{
if(arquivo == "iniciar")
{
NomeArquivo=TempoData.FormatString("hh;nn__dd_mm_yyyy")+".txt";
Form1->RichEdit1->Clear();

Form1->RichEdit1->Lines->Add("Data Horario Rg PAR Ta_1 UR_1 Tc VV Ta_2 UR_2 Rg_cv
PAR_cv Ta_cv UR_cv VV_cv frequencia_15 R21_15 SWP_15 frequencia_13 R21_13
SWP_13
frequencia_12 R21_12 SWP_12 frequencia_10 R21_10 SWP_10 frequencia_11 R_11 t_11");

Form1->RichEdit1->Lines->Add(""+DateToStr(Date())+" hh:min W/m2 µmol/s¹.m² °C % °C m/s
°C %
W/m2 µmol/s¹.m² °C % m/s Hz Ohms KPa Hz Ohms KPa Hz Ohms KPa Hz Ohms KPa Hz
Ohms
°C");
arquivo = "atual";
}
}
```

```
if(dd_old != dd)
```

```
{
NomeArquivo = TempoData.FormatString("hh;nn__dd_mm_yyyy")+".txt";
arquivo = "novo";
x_dia=0;
```

```

}

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

    Form1->RichEdit1->Lines->Add("Data Horário Rg PAR Ta_1 UR_1 Tc VV Ta_2 UR_2 Rg_cv
    PAR_cv Ta_cv UR_cv VV_cv frequencia_15 R21_15 SWP_15 frequencia_13 R21_13
    SWP_13
    frequencia_12 R21_12 SWP_12 frequencia_10 R21_10 SWP_10 frequencia_11 R_11 t_11");

    Form1->RichEdit1->Lines->Add("" + DateToStr(Date()) + " hh:min W/m2 µmol/s¹.m² °C % °C m/s
    °C %
    W/m2 µmol/s¹.m² °C % m/s Hz Ohms KPa Hz Ohms KPa Hz Ohms KPa Hz Ohms KPa Hz
    Ohms
    °C");
    arquivo = "atual";
}
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
    struct time t_control; //necessita da biblioteca #include<dos.h>
    int x=0;
    unsigned char valor;

    Form1->Timer1->Enabled=true; //habilita o temporizador denominado "Relogio"
    Estado_Control=0;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Timer1Timer(TObject *Sender)
{
    TempoData = Now();
    AnsiString z;
    nn = TempoData.FormatString("nn"); // minuto atual
    dd = TempoData.FormatString("dd"); // dia atual
    if(x_dia == 0)
    {
        dd_old = TempoData.FormatString("dd");
        x_dia=1;
    }
    if(x==0)
    {
        nn_old = nn;

```

```

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

if(nn_old != nn)
{
Verifica_Arquivo();
Form1->TV->Items->Item[0]->Text="Sistema de Aquisição de Dados: ";
Form1->Timer1->Enabled=false; //desabilita o temporizador denominado "Relógio"
Pulsos_Sensor_Umidade_Temperatura(); //Fica 50 segundos
Form1->Timer1->Enabled=true; //habilita o temporizador denominado "Relógio"
Temperatura_Umidade_Substrato();
Controle_Reles();
Modulos_Seriais();
Equacoes_Sensores();

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

//Apresenta os dados no Componente TreeView
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Text="Radiação global: "
+FloatToStrF(Rg,ffFixed,4,0) + " W/m²";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Text="PAR: "
+FloatToStrF(PAR,ffFixed,4,0) + " µmol/s¹.m²";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[0]->Text="Temperatura do ar: "
+FloatToStrF(Ta_1,ffFixed,2,1) + " °C";
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[1]->Text="Umidade relativa: "
+FloatToStrF(UR_1,ffFixed,3,0) + " %";

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

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[3]->Item[3]->Text="Velocidade do vento: "
+FloatToStrF(VV,ffFixed,4,2) + " m/s";

//Apresenta dados da casa-de-vegetação
Form1->TV->Items->Item[0]->Item[5]->Item[0]->Text="Radiação global: "
+FloatToStrF(Rg_cv,ffFixed,4,0) + " W/m²";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[5]->Item[1]->Text="PAR: "

```

+FloatToStrF(PAR_cv,ffFixed,4,0) + " $\mu\text{mol/s}^1.\text{m}^2$ ";

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

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[5]->Item[3]->Text="Umidade relativa: "
+FloatToStrF(UR_cv,ffFixed,3,0) + " %";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[5]->Item[4]->Text="Velocidade do vento: "
+FloatToStrF(VV_cv,ffFixed,4,2) + " m/s";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[0]->Item[0]->Text="Frequência: "
+FloatToStrF(frequencia_15,ffFixed,4,0) + " Hz";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[0]->Item[1]->Text="Resistência: "
+FloatToStrF(R_15,ffFixed,6,0) + " Ohms";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[0]->Item[2]->Text="Tensão: "
+FloatToStrF(Tensao_Sem_Estresse,ffFixed,4,0) + " KPa";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[0]->Item[3]->Text="Número Irrigações: "
+FloatToStrF(Numero_Irigacoes_Sem_Estresse,ffFixed,3,0) + " ";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[1]->Item[0]->Text="Frequência: "
+FloatToStrF(frequencia_13,ffFixed,4,0) + " Hz";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[1]->Item[1]->Text="Resistência: "
+FloatToStrF(R_13,ffFixed,6,0) + " Ohms";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[1]->Item[2]->Text="Tensão: "
+FloatToStrF(Tensao_Estresse_Leve,ffFixed,4,0) + " KPa";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[1]->Item[3]->Text="Número Irrigações: "
+FloatToStrF(Numero_Irigacoes_Estresse_Leve,ffFixed,3,0) + " ";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[2]->Item[0]->Text="Frequência: "
+FloatToStrF(frequencia_12,ffFixed,4,0) + " Hz";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[2]->Item[1]->Text="Resistência: "
+FloatToStrF(R_12,ffFixed,6,0) + " Ohms";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[2]->Item[2]->Text="Tensão: "
+FloatToStrF(Tensao_Estresse_Moderado,ffFixed,4,0) + " KPa";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[2]->Item[3]->Text="Número Irrigações: "

```

+FloatToStrF(Numero_Irigacoes_Estresse_Moderado,ffFixed,3,0) + " ";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[3]->Item[0]->Text="Frequência: "
+FloatToStrF(frequencia_10,ffFixed,4,0) + " Hz";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[3]->Item[1]->Text="Resistência: "
+FloatToStrF(R_10,ffFixed,6,0) + " Ohms";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[3]->Item[2]->Text="Tensão: "
+FloatToStrF(Tensao_Estresse_Severo,ffFixed,4,0) + " KPa";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[0]->Item[3]->Item[3]->Text="Número Irrigações: "
+FloatToStrF(Numero_Irigacoes_Estresse_Severo,ffFixed,3,0) + " ";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[1]->Item[0]->Text="Frequência: "
+FloatToStrF(frequencia_11,ffFixed,4,0) + " Hz";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[1]->Item[1]->Text="Resistência: "
+FloatToStrF(R_11,ffFixed,6,0) + " Ohms";

Form1->TV->Items->Item[0]->Item[6]->Item[1]->Item[2]->Text="Temperatura: "
+FloatToStrF(t_11,ffFixed,3,1) + " °C";

RichEdit1->Lines->Add(" "+TempoData.FormatString("hh:nn")
+" "+FloatToStrF(Rg,ffFixed,4,0)
+" "+FloatToStrF(PAR,ffFixed,4,0)
+" "+FloatToStrF(Ta_1,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(UR_1,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(Tc,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(VV,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(Ta_2,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(UR_2,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(Rg_cv,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(PAR_cv,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(Ta_cv,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(UR_cv,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(VV_cv,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(frequencia_15,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(R_15,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(Tensao_Sem_Estresse,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(frequencia_13,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(R_13,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(Tensao_Estresse_Leve,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(frequencia_12,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(R_12,ffFixed,3,1)
+" "+FloatToStrF(Tensao_Estresse_Moderado,ffFixed,3,1)

```

```

        +" "+FloatToStrF(frequencia_10,ffFixed,3,1)
        +" "+FloatToStrF(R_10,ffFixed,3,1)
        +" "+FloatToStrF(Tensao_Estresse_Severo,ffFixed,3,1)
        +" "+FloatToStrF(frequencia_11,ffFixed,3,1)
        +" "+FloatToStrF(R_11,ffFixed,3,1)
        +" "+FloatToStrF(t_11,ffFixed,3,1));

RichEdit1->Lines->SaveToFile(NomeArquivo);
nn_old=nn;
}
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject *Sender)
{
    Close();
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button3Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Sem_Estresse=1;
    Form1->Shape1->Brush->Color = clRed;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button4Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Sem_Estresse=0;
    Form1->Shape1->Brush->Color = clWhite;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button5Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Estresse_Leve=2;
    Form1->Shape2->Brush->Color = clRed;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button7Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Estresse_Moderado=4;
}

```

```

Form1->Shape3->Brush->Color = clRed;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button9Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Estresse_Severo=8;
    Form1->Shape4->Brush->Color = clRed;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button6Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Estresse_Leve=0;
    Form1->Shape2->Brush->Color = clWhite;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button8Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Estresse_Moderado=0;
    Form1->Shape3->Brush->Color = clWhite;
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button10Click(TObject *Sender)
{
    Estado_Control=1;
    Logica_Estresse_Severo=0;
    Form1->Shape4->Brush->Color = clWhite;
}
//-----

```