**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de
cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento em dois ciclos de cultivo**

Lucas da Costa Santos

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Lucas da Costa Santos
Engenheiro Agrônomo

Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento em dois ciclos de cultivo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Santos, Lucas da Costa

Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento em dois ciclos de cultivo / Lucas da Costa Santos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016. 195 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Irrigação sob déficit 2. *Saccharum* spp 3. Déficit hídrico 4. Produtividade da água
5. Rendimento de colmos 6. Biomassa 7. Etanol de segunda geração I. Título

CDD 633.61
S237p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais, José Pedro e Severina, que sempre foram e continuam sendo o meu alicerce, nunca medindo esforços para que os meus sonhos se realizassem. Essa vitória também é de vocês!

Aos meus irmãos, Luciana, Luciene e Luiz Pedro, pelo apoio irrestrito em todos os momentos da minha vida.

DEDICO

*À minha querida esposa Adma,
pelo companheirismo sem barreiras e
por saber que estará sempre ao meu lado.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, e por todas as oportunidades que o Senhor tem me permitido sonhar e realizar;

Ao meu pai e à minha mãe, pela dedicação, ensinamentos, apoio, carinho e incentivo ao longo de toda minha vida, ingredientes que me mantiveram sempre forte, por mais difícil que tenha sido o trajeto;

Aos meus irmãos, a amizade e a presença sempre constante de vocês me fortalece a todo momento;

A minha amada esposa, pelo amor, carinho, compreensão e motivação constante, além da parceria incondicional em nossos “grandes” projetos de vida;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, pela oportunidade, ensinamentos, amizade e, sobretudo, pela confiança depositada em mim no decorrer do curso, todos estes ingredientes foram imprescindíveis para o meu amadurecimento acadêmico e pessoal;

Aos amigos e “irmãos” de orientação, Daniel Philipe Veloso Leal, Eusímio Felisbino Fraga Junior e Fernando da Silva Barbosa. A parceria estabelecida com vocês é para toda vida;

Aos amigos da república, Guilherme Pereira, Yuri Caires, Thiago Aragão, Rafael Tassinari, Mateus Vicente, Hugo Rosa, Stevan Bordignon e Gustavo Martins, pela amizade e bons momentos de descontração;

Aos amigos pós-graduandos e também colaboradores no Projeto “PAC-CANA”, Jonathan Lizcano, Marcos Amaral, Nathália Ribeiro e Timóteo Barros, além dos estagiários de iniciação científica, Liz Oliveira e Vinícius Perin, a colaboração de vocês foi fundamental na realização dos experimentos.

Aos amigos, Alex Almeida, Asdrúbal Ramires, Jéfferson Costa, Jefferson Vieira, pela amizade, conselhos, “discussões científicas” e convívio diário.

Aos amigos e colegas do departamento, Acácio Perbone, Bruno Alves, Bruno Lena, Bruno Marçal, Diego Brandão, Érica Nakai, Hermes Rocha, Hugo Thaner, Irineu Andrade, João Paulo, José Guilherme, Lívia Previatello, Luis Carvalho, Magda Bonilla, Maria Alejandra, Osvaldo Nogueira, Rafael Dreux, Rafael Maschio, Wagner Wolff entre outros não citados, pelo convívio e momentos de descontração;

Aos Professores, Dr. Tarlei Arriel Botrel, Dr. Paulo César Sentelhas e Dr. Marcelo de Almeida Silva, pela colaboração e importantes sugestões de melhoria a minha pesquisa durante o exame de qualificação;

Aos professores Dr. Fábio Ricardo Marin, Dr. José Antônio Frizzzone, Dr. Luiz Roberto Angelocci, Dra. Patrícia Angélica Alves Marques, Dr. Paulo César Sentelhas, Dr.

Sérgio Nascimento Duarte e Dra. Sônia Maria de Stefano Piedade, pelos ensinamentos e por compartilharem um pouco de suas experiências;

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Biosistemas, em especial às secretárias, Ângela, Beatriz, Davilmar e Paula, e ainda aos colaboradores diretos na instalação e condução dos experimentos, Afonso, Agnaldo, Sr. Antônio, Áureo, Ezequiel, Gilmar, Hélio, José Geraldo, Juarez, Luiz, Marinaldo e Paulinha, agradeço a todos pela colaboração.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP e à Empresa Odebrecht Agroindustrial, que através do Projeto PITE 2012/50083-7 disponibilizaram os recursos financeiros necessários para a realização deste projeto de pesquisa e para meu treinamento no exterior, podendo participar do "*DSSAT 2014 International Training Program*" realizado em Griffin na Georgia - EUA.

Aos colaboradores da Empresa Odebrecht Agroindustrial, os engenheiros Américo Ferraz Dias Neto e Bernardo Yasuhiro Ide, pelas sugestões e experiências compartilhadas nas visitas e reuniões científicas realizadas ao longo do experimento. Aos Srs. Carlos Calmanovici e Frederico Ramazzine Braga pelo apoio administrativo relacionado à gestão do contrato com a Empresa Odebrecht.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI) em especial ao Prof. Dr. José Antônio Frizzzone, aos Engenheiros Yoran Kontral, Daniel Pedroso, Marcos Kawasse e Daniel Neves (Empresa Netafim), Dr. Márcio Santos (Empresa Lindsay), Prof. Derrel Martin (University of Nebraska), Prof. Ronnie D. Green (Water for Food Institute), Engenheiros Urubathan Palhares Klink, José Guilherme Scanavini (CanaVialis - Monsanto) e Dr. Geoff Inman-Bamber (CSIRO-Austrália) pelo apoio no encaminhamento deste projeto de pesquisa.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas ESALQ/USP, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta participaram dessa fase da minha vida, ajudando, orientando ou mesmo aconselhando.

BIOGRAFIA

Lucas da Costa Santos, filho de José Pedro Pereira dos Santos e Severina da Costa Santos, nasceu em Bom Jesus da Lapa/BA, em 20 de dezembro de 1984.

Em dezembro de 2002 concluiu o ensino médio juntamente com o curso profissionalizante (técnico em agropecuária), na Escola Agrotécnica Federal “Antônio José Teixeira” (atualmente Instituto Federal Baiano), na cidade de Guanambi/BA.

Em setembro de 2005, iniciou o curso de Engenharia Agrônoma na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, localizada na cidade de Vitória da Conquista/BA. Durante três anos foi bolsista de iniciação científica e graduou-se no primeiro semestre de 2010.

Em agosto de 2010, iniciou o mestrado na Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista – FCA/UNESP, campus de Botucatu, no Programa de Irrigação e Drenagem, concluindo o curso em julho de 2012.

Em agosto do mesmo ano, iniciou seu doutoramento pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, na Universidade de São Paulo – ESALQ/USP, vindo a obter o título de doutor em Ciências (Engenharia de Sistemas Agrícolas) em abril de 2016.

"Penso nas aventuras insignificantes da minha vida,
nos meus temores pequenos, porém grandes aos meus olhos.
Tantos foram os obstáculos que tive de superar,
para só agora perceber que existe um só motivo à razão de tudo:
viver para contemplar o amanhecer de um novo dia e
enxergar a luz que ilumina o mundo"

(antiga canção esquimó)

SUMÁRIO

RESUMO	15
ABSTRACT	17
LISTA DE FIGURAS	19
LISTA DE TABELAS	25
1 INTRODUÇÃO.....	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 Cana-de-açúcar: origem, história e importância.....	33
2.2 Aspectos gerais da cultura	35
2.3 Dinâmica da área foliar	38
2.4 Crescimento e acúmulo de biomassa.....	39
2.5 Irrigação na cana-de-açúcar.....	42
2.6 Produtividade da água	45
2.7 Produtividade da água para a cana-de-açúcar.....	48
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3.1 Localização e caracterização da área experimental	53
3.2 Delineamento experimental e tratamentos	55
3.3 Montagem da plataforma PAC-Cana	62
3.4 Solo e caracterização físico-químico-hídrica	64
3.5 Sistema de irrigação.....	67
3.6 Sensores de solo e meteorológicos	69
3.7 Condução dos experimentos.....	72
3.7.1 Plantio e transplante das mudas	72
3.7.2 Manejo fitossanitário e nutricional	73
3.7.3 Manejo da irrigação	77
3.8 Variáveis mensuradas nos experimentos.....	79
3.8.1 Área foliar.....	80
3.8.1.1 Determinação da área foliar (AF)	80
3.8.1.2 Área foliar específica (AFE).....	82
3.8.1.3 Fator de forma (FF)	82
3.8.1.4 Índice de área foliar (IAF)	83
3.8.2 Particionamento da biomassa	83

3.8.3 Parâmetros tecnológicos do colmo	85
3.8.3.1 Análises do caldo extraído	87
3.8.3.1.1 Brix do caldo	87
3.8.3.1.2 Pol do caldo	87
3.8.3.1.3 Pureza aparente do caldo	88
3.8.3.2 Fibra da cana-de-açúcar	90
3.8.3.3 Açúcares redutores da cana	91
3.8.3.4 Açúcar total recuperável	91
3.8.4 Umidade do colmo	91
3.8.5 Produtividade de colmos por hectare	92
3.8.6 Rendimento bruto de açúcar	92
3.8.7 Produtividade da água para açúcar	93
3.8.8 Produtividade da água para etanol de 1ª geração	93
3.8.9 Biomassa seca da parte aérea das plantas	94
3.8.10 Produtividade da água para biomassa	94
3.8.11 Produtividade da água para etanol de 2ª geração da cana-de-açúcar	94
3.9 Determinação dos componentes lignocelulósicos	97
3.10 Índice de Colheita	98
3.11 Índice de Maturação	99
3.12 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET _o) e do coeficiente de cultura (K _c)	100
3.13 Análise dos resultados	102
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
4.1 Variáveis meteorológicas e evapotranspiração de referência	105
4.2 Manejo nutricional das plantas	109
4.3 Demanda hídrica das variedades e estimativa do coeficiente de cultivo (K _c)	116
4.4 Dinâmica da área foliar	124
4.5 Acúmulo e particionamento da biomassa seca da cana-de-açúcar	134
4.6 Índices tecnológicos e rendimento industrial da cana-de-açúcar	148
4.6.1 Brix do caldo	149
4.6.2 Açúcar total recuperável – ATR	151
4.6.3 Porcentagem de fibra da cana-de-açúcar	152
4.6.4 Toneladas de colmos por hectare – TCH	154
4.6.5 Rendimento bruto de açúcar – RBA	157
4.7 Índices de maturação e produção da cana-de-açúcar	159

4.7.1 Índice de maturação – IM	160
4.7.2 Índice de colheita – IC	162
4.8 Indicadores de produtividade da água	164
4.8.1 Produtividade da água para açúcar – PAA	165
4.8.2 Produtividade da água para etanol de 1 ^a geração – PAE1G	167
4.8.3 Biomassa seca total da parte aérea – BIOM	169
4.8.4 Produtividade da água para biomassa – PAB	172
4.8.5 Produtividade da água para etanol de 2 ^a geração – PAE2G	173
5 CONCLUSÕES	177
REFERÊNCIAS	179

RESUMO

Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento em dois ciclos de cultivo

A irrigação quando bem manejada, pode minimizar os riscos econômicos da atividade sucroalcooleira, particularmente em safras com presença de instabilidade climática onde a restrição hídrica, promovida pela diminuição no volume de chuvas, pode reduzir a produtividade dos canaviais. Dentre as ferramentas disponíveis para a gestão eficiente da água na agricultura irrigada, a técnica de irrigação sob déficit pode se tornar uma escolha acertada para a cana-de-açúcar, desde que sejam identificadas as fases fenológicas e épocas de cultivo onde a limitação da oferta de água não implique em reduções antieconômicas no rendimento da cultura. Diante disso, a hipótese que norteia essa pesquisa, é a de que existe uma estratégia de irrigação sob déficit, que associada a uma variedade com características específicas, possibilite a expressão de indicadores de produtividade tão satisfatórios quanto os obtidos em condições de irrigação plena. Nessa linha, os objetivos da pesquisa envolveram o estudo da dinâmica foliar, acúmulo e particionamento de biomassa e ainda, índices de produtividade da água para biomassa, açúcar e etanol de 1ª e 2ª geração de oito variedades de cana-de-açúcar, submetidas a diferentes condições de disponibilidade hídrica no solo em dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca). A pesquisa foi realizada na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em Piracicaba/SP, onde foram estudados os dois primeiros ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, sendo estes abordados nesta tese como Experimento 1 (cana-planta) e Experimento 2 (cana-soca). O delineamento experimental adotado para ambos os ciclos foi o de blocos casualizados, com três blocos completos. Os tratamentos foram compostos por três fatores em esquema de parcelas sub-subdivididas. Estas parcelas foram formadas por duas plantas (touceiras) alocadas em um vaso com aproximadamente 330 litros de solo. No Experimento 1, foram estudados três fatores, sendo o primeiro e segundo com quatro níveis e o terceiro com oito (4x4x8), totalizando assim 128 tratamentos, sendo eles: quatro níveis de irrigação ao longo do ciclo (125, 100, 75 e 50% da ETc); oito variedades comerciais de cana-de-açúcar e quatro procedimentos de maturação, impostos por meio de variações na intensidade do déficit hídrico aplicado. Para o Experimento 2, substitui-se o fator Maturação por Épocas de Corte, o qual consistiu em colheitas de um quarto do experimento a cada 90 dias. Os resultados encontrados apontaram que a área foliar responde positivamente a maior disponibilidade hídrica no solo, tendo sido verificado uma relação proporcional entre estes. Quanto ao acúmulo de biomassa, verificou-se que para as oito variedades estudadas houve incremento de biomassa a medida em que se aumentou o volume de água disponibilizado às variedades. No tocante ao particionamento, as folhas foram os drenos principais de fotoassimilados da planta até os 100 dias de cultivo, sendo que após este período, os colmos ocuparam o lugar de dreno preferencial. Os indicadores de produtividade da água apresentaram diferenças significativas para o fator lâmina, o que indica a existência de cultivares de cana-de-açúcar mais eficientes no uso da água. Por fim, observou-se que a produtividade da água para etanol total apresentou valores expressivos, com média para essa variável igual a $1,81 \text{ L m}^{-3}$, o que denota o potencial de rendimento de etanol (1G + 2G) a partir da cana-de-açúcar quando é adotado o aproveitamento integral das plantas.

Palavras-chave: Irrigação sob déficit; *Saccharum* spp; Déficit hídrico; Produtividade da água; Rendimento de colmos; Biomassa; Etanol de segunda geração

ABSTRACT

Biomass production and efficient use of water for eight varieties of sugarcane drip irrigated in two crops

Irrigation when managed, can minimize the economic risks of sugarcane activity, particularly in crops with the presence of climatic instability where water restriction, promoted by the decrease in rainfall, can reduce the productivity of sugarcane fields. Among the tools available to effectively irrigation manage, under deficit irrigation technique can become a right choice for sugarcane, provided they are investigated phenological stages and growing seasons where the limitation of the supply of water does not lead to uneconomical reductions in crop yield. Therefore, the hypothesis that guides this work is that there is a strategy of deficit irrigation, which associated with a cultivar with specific characteristics, enables the expression of productivity indicators as satisfactory as those obtained in full irrigation conditions. In this context, the objectives of this research involves the study of leaf dynamics, biomass accumulation and partitioning and also the water productivity indices for biomass, sugar and ethanol from 1st and 2nd generation of eight variety of sugarcane, subject to different conditions of soil water availability in two crop cycles (cane plant and ratoon crop). The research was conducted at the College of Agriculture "Luiz de Queiroz", Piracicaba-SP, Brazil. The research was conducted in the first two cycles of cultivation of sugarcane, which are named in this thesis as Experiment 1 (plant crop) and Experiment 2 (ratoon crop). The experimental design adopted for both cycles was blocks randomized, with three complete blocks. The treatments were three factors in scheme of sub-split plot. These plots were formed by two plants (clumps) placed in a pot with about 330 liters of soil. In Experiment 1, three factors were studied, the first and second with four levels and the third with eight (4x4x8), totalizing 128 treatments, as follows: four levels of irrigation throughout the cycle (125, 100, 75 and 50% ETc); eight commercial varieties of sugarcane and four maturity procedures imposed by means of variations in the intensity of water deficit applied. For Experiment 2, the maturation factor was replace for Seasons Court, which consisted in harvests of a quarter of the experiment every 90 days. The results showed that the leaf area responds positively to greater soil water availability, having been verified a proportional relationship between these variables. For the biomass accumulation, it was found, for the eight varieties studied, an increment of biomass while was increase the volume of water available for the varieties. Regarding the partitioning, the leaves were the preferred structures of the plant until the 100 days of cultivation, and after this period, the stems took the place of preferred drain. Water productivity indicators showed significant differences for the irrigation depth factor, which indicates the existence of sugarcane cultivars water use more efficient. Finally, it was observed that the total water productivity to ethanol showed significant values, with a mean for that variable equal to 1.81 L m⁻³, which shows the ethanol yield potential (1G + 2G) from sugarcane when it adopted the overall use of plants.

Keywords: Deficit irrigation; *Saccharum* spp; Water stress; Water productivity; Yield; biomass; Second generation ethanol

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estádios fenológicos da cana-de-açúcar.....	36
Figura 2 – Ganhos de produtividade da água (PA) no passado e expectativas de incremento futura, para os diferentes níveis de produtividade agrícola	50
Figura 3 – Localização da estufa (área experimental) no Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ.....	53
Figura 4 – Estufa experimental e unidade de apoio.....	54
Figura 5 – Detalhe da parcela experimental com as duas plantas de cana	55
Figura 6 – Épocas de diferenciação das lâminas de irrigação impostas às variedades para os ciclos de cultivo	56
Figura 7 – Representação gráfica das frações das lâminas aplicadas durante a fase de maturação	58
Figura 8 – Croqui da distribuição dos tratamentos pelo delineamento em blocos casualizados com parcelas-sub-subdivididas (split-split-plot) para o primeiro ciclo de cultivo (cana-planta)	60
Figura 9 – Croqui da distribuição dos tratamentos pelo delineamento em blocos casualizados com parcelas-sub-subdivididas (split-split-plot) para o segundo ciclo de cultivo (cana-soca) ..	61
Figura 10 – Adequação da estrutura interna da estufa.....	63
Figura 11 – Preparação das parcelas experimentais	64
Figura 12 – Coleta de amostras deformadas de solo	65
Figura 13 – Coleta de amostras indeformadas de solo para realização de análises físico-hídricas	66
Figura 14 – Montagem do sistema de irrigação, quimigação, instalação dos tensiômetros e dos sensores meteorológicos	70
Figura 15 – Preparo das gemas, plantio e transplantio	75
Figura 16 – Medidor de área foliar de bancada LI-3100C	80
Figura 17 – Regressão entre área foliar e matéria seca das folhas para determinação do modelo utilizado para a estimativa da área foliar total das parcelas experimentais.....	81
Figura 18 – Estufa de secagem com circulação forçada de ar e balança digital de precisão ..	82
Figura 19 – Regressão entre área foliar e o produto entre comprimento e largura máxima das folhas para determinação do modelo utilizado para caracterização do fator de forma	83
Figura 20 – Fracionamento da biomassa aérea das plantas de cana.....	84

Figura 21 – Croqui dos sub-blocos de colheita.....	86
Figura 22 – Imagens da colheita e análises tecnológicas.....	89
Figura 23 – Esquema do rendimento máximo teórico da produção de etanol celulósico.....	95
Figura 24 – Frações de celulose, hemicelulose e lignina em componentes da planta de cana-de-açúcar.....	98
Figura 25 – Extração do caldo e determinação do Índice de Maturação	99
Figura 26 – Regressão entre radiação solar global e saldo de radiação no interior da estufa.	101
Figura 27 – Regressão entre a estimativa da ETo a partir da equação de Penman-Monteith FAO-56 (dados externos – Posto Meteorológico) e a de Priestley-Taylor (dados do interior da estufa).....	101
Figura 28 – Temperatura máxima, mínima e média do ar no interior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar	105
Figura 29 – Umidade relativa máxima, mínima e média do ar no interior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar.....	106
Figura 30 – Radiação solar global no interior da estufa e a céu aberto durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar.....	107
Figura 31 – Manutenções realizadas no plástico de cobertura da estufa	107
Figura 32 – Relação entre os dados de radiação solar global do interior e exterior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar	108
Figura 33 – Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) diária calculada para o interior e exterior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar.....	108
Figura 34 – Plantas de cana-de-açúcar com sintomas de fitotoxidez por sódio	116
Figura 35 – Irrigação total acumulada (litros) por parcela no tratamento com lâmina de 100%, para as oito variedades estudadas durante o ciclo da cana-planta.....	117
Figura 36 – Irrigação total acumulada (litros) por parcela no tratamento com lâmina de 100%, para as oito variedades estudadas durante o ciclo da cana-soca	118
Figura 37 – Demanda hídrica das oito variedades estudadas nos quatro regimes de irrigação impostos, para os ciclos da cana-planta e cana-soca.....	120
Figura 38 – Coeficiente de cultivo para as oito variedades e quatro épocas de corte ao longo do ciclo da cana-soca	123
Figura 39 – Coeficiente de cultivo para as oito variedades e quatro épocas de corte ao longo do ciclo da cana-soca	124

Figura 40 – Área foliar total da parcela das oito variedades estudadas e submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica no solo	126
Figura 41 – Variabilidade da área foliar ao longo do ciclo da cana-soca, para as oito variedades e quatro condições de disponibilidade hídrica no solo	127
Figura 42 – Proporção entre área foliar sinteticamente ativa e área foliar seca; Índice de Área Foliar (IAF) para as oito variedades estudadas, submetidas a reposição hídrica de 100%	129
Figura 43 – Número de folhas verdes (NFVE) expandidas para as oito variedades estudadas, sob lâmina de 100% ao longo das quatro épocas de corte.....	130
Figura 44 – Fator de forma da folha +3 (média de quatro corte), para as oito variedades de cana-de-açúcar estudadas e submetidas ao tratamento de irrigação com lâmina de 100% demanda hídrica potencial, no ciclo da cana-soca.....	131
Figura 45 – Área foliar específica (AFE, $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) das oito variedades estudadas, submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, para as quatro épocas de corte realizadas no ciclo da cana-soca.....	133
Figura 46 – Biomassa seca total da parte aérea para as oito variedades de cana-de-açúcar, submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, ao final dos ciclos da cana-planta e cana-soca	136
Figura 47 – Biomassa seca total da parte aérea para as oito variedades de cana-de-açúcar, submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, ao final dos ciclos da cana-planta e cana-soca	139
Figura 48 – Particionamento da biomassa seca total da parte aérea de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 106 DAC (1ª Amostragem).....	140
Figura 49 – Particionamento da biomassa seca total da parte aérea de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 205 DAC (2ª Amostragem).....	142
Figura 50 – Particionamento da biomassa seca total da parte aérea de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 288 DAC (3ª Amostragem).....	144
Figura 51 – Particionamento da biomassa seca total da parte aérea de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 376 DAC (4ª Amostragem).....	145

Figura 52 – Frações da biomassa da parte aérea total para os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca) particionadas em colmos e palha, para as oito variedades estudadas e submetidas ao tratamento de lâmina de 100%	146
Figura 53 – Frações da biomassa da parte aérea particionada em folhas, bainhas e colmos, para as oito variedades estudadas e submetidas ao tratamento de lâmina de irrigação de 100%	147
Figura 54 – Valores de brix do caldo para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca..	149
Figura 55 – Médias dos valores de brix do caldo para os dois ciclos de cultivo das 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina.....	150
Figura 56 – Valores de ATR (kg t^{-1}) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca..	151
Figura 57 – Rendimento de ATR (kg t^{-1}) para as oito variedades estudadas nos dois ciclos de cultivo.....	152
Figura 58 – Médias do percentual de fibras para as 8 variedades estudadas nos dois ciclos de cultivo.....	153
Figura 59 – Médias do percentual de fibras para as oito variedades estudadas nos dois ciclos de cultivo.....	154
Figura 60 – Valores de TCH (t ha^{-1}) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca..	155
Figura 61 – Médias dos valores de TCH (t ha^{-1}) para os dois ciclos de cultivo das 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina.	156
Figura 62 – Valores de RBA (t ha^{-1}) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca..	157
Figura 63 – Rendimento Bruto de Açúcar (RBA) médio para os ciclos da cana-planta e cana-soca.....	158
Figura 64 – Médias dos valores de RBA (t ha^{-1}) para os dois ciclos de cultivo das 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina.	159
Figura 65 – Índice de Maturação para as oito variedades estudadas, sob quatro diferentes lâminas de irrigação em dois ciclos de cultivo.	161
Figura 66 – Índice de Maturação a partir do Brix ponta/base e Brix médio superior/base	161
Figura 67 – Índice de Colheita para as oito variedades estudadas, sob quatro diferentes lâminas de irrigação (média da cana-planta e cana-soca).	163

Figura 68 – Médias dos dois ciclos de cultivo para valores de PAA para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina.....	167
Figura 69 – Médias dos dois ciclos de cultivo para valores de PAE1G ($L\ m^{-3}$) para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina.	169
Figura 70 – Valores de biomassa seca total da parte aérea ($t\ ha^{-1}$) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca	170
Figura 71 – Médias dos dois ciclos de cultivo para valores de biomassa seca total da parte aérea para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina.....	171
Figura 72 – Médias dos ciclos de cultivo para valores de PAB para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina.	173
Figura 73 – Produtividade de etanol de 2ª geração a partir das frações celulose e hemicelulose, obtidas de oito variedades de cana-de-açúcar submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, nos ciclos da cana-planta e cana-soca.....	175
Figura 74 – Valores de PAE _{TOTAL} para as oito variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frações de biomassa total da parte aérea da cana-de-açúcar	41
Tabela 2 – Consumo hídrico da cana-de-açúcar, em diferentes regiões do mundo	44
Tabela 3 – Produtividade da água para diversas culturas	47
Tabela 4 – Ganhos de produtividade, em porcentagem, para várias culturas a partir da substituição do sistema de irrigação por superfície para o sistema de gotejamento.....	47
Tabela 5 – Decodificação das variedades de cana-de-açúcar, com seus respectivos nomes comerciais e empresas responsáveis pelo melhoramento.....	57
Tabela 6 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes realizada nos três blocos do experimento para os dois ciclos de cultivo.	65
Tabela 7 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes realizada nos três blocos do experimento para os dois ciclos de cultivo.	66
Tabela 8 – Caracterização físico-hídrica do solo.....	67
Tabela 9 – Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980).....	67
Tabela 10 – Relação de fertilizantes utilizados durante os ciclos da cana-planta e cana-soca, com suas dosagens e modalidades de aplicação	77
Tabela 11 – Índice de maturação da cana-de-açúcar baseado na relação dos valores de Brix do ápice e da base do colmo	100
Tabela 12 – Resultado da análise química do solo para macro e micronutrientes aos 130 DAP (junho de 2013), para parcelas submetidas ao tratamento L100 das variedades V1, V3, V4 e V8	110
Tabela 13 – Resultado da análise foliar para macro e micronutrientes realizada aos 130 DAP (junho de 2013) nas parcelas do tratamento L100 para todas as variedades	110
Tabela 14 – Resultado da análise química do solo para macro e micronutrientes aos 410 DAP (março de 2014), para parcelas submetidas ao tratamento L100 das variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8.....	111
Tabela 15 – Resultado da análise foliar para macro e micronutrientes realizada aos 580 DAP (setembro de 2014) nas parcelas do tratamento L100 para todas as variedades	112
Tabela 16 – Resultado da análise química da solução do solo extraída em três profundidades de parcelas submetidas ao tratamento de irrigação L100 para as variedades V1, V4 e V8 nos meses de maio e julho de 2013 (cana-planta).....	113

Tabela 17 – Resultado da análise química da solução do solo extraída em três profundidades de parcelas submetidas ao tratamento de irrigação L100 para as variedades V13, V4 e V7 650 DAP (novembro de 2014).....	114
Tabela 18 – Valores de condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Cloro (Cl), Sódio (Na), Carbonato (CO ₃), Bicarbonato (HCO ₃) e Razão de Adsorção de Sódio (RAS) encontrados na análise química da água utilizada para irrigação no campus “Luiz de Queiroz” da USP (dezembro de 2014).....	114
Tabela 19 – Volume total de água aplicada (litros) por parcela para todos os tratamentos nos dois ciclos de cultivo (cana-soca e cana-planta)	119
Tabela 20 – Valores estimados de Kc médio ao longo dos ciclos para as oito variedades e todas as lâmina estudadas neste experimento	121
Tabela 21 – Análise de variância para a variável BTPA de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca)	135
Tabela 22 – Resumo da análise de variância para a variável BTPA de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo e quatro épocas de corte, durante o ciclo da cana-soca.....	137
Tabela 23 – Teste de média para a variável BTPA de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo e quatro épocas de corte, durante o ciclo da cana-soca	137
Tabela 24 – Desdobramento da interação Lâmina x Variedade para a variável BTPA durante a 3ª época de amostragem no ciclo da cana-soca.....	138
Tabela 25 – Resumo da análise de variância para as variáveis Brix, ATR, Fibra, TCH e RBA de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca).	148
Tabela 26 – Resumo da análise de variância para os Índices de Maturação e Colheita, aplicados em oito cultivares de cana-de-açúcar conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo e durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca).	160
Tabela 27 – Índices de colheita baseados em açúcar (IC _{A/C}) e colmo (IC _{C/B}) para oito variedades de cana-de-açúcar submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, durante os ciclos da cana-planta e cana-soca.	164

Tabela 28 – Resumo da análise de variância para Produtividade da Água para Açúcar (PAA), Produtividade da Água para Etanol de 1ª Geração (PAE1G), Biomassa seca total da parte aérea (BIOM) e Produtividade da Água para Biomassa (PAB) de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca).....	165
Tabela 29 – Resumo da análise de variância para Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração para a fração celulose (PAE2G _{CELULOSE}), Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração para a fração hemicelulose (PAE2G _{HEMICELULOSE}), Produtividade da Água para Etanol Total (PAE _{TOTAL}) de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca)	174

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, explorando aproximadamente nove milhões de hectares plantados e produzindo mais de 650 milhões de toneladas de cana, o que coloca o país na liderança mundial em tecnologia de produção de etanol e açúcar a partir desta cultura (MAPA, 2015).

A importância desta cultura não é apenas nacional, recentemente a cana-de-açúcar passou a ser considerada como *commodity*, valorizada pela capacidade que tem de gerar energia limpa e renovável e de substituir parte da matriz energética global, atualmente centrada na utilização de combustíveis de origem fóssil (FARIAS, 2008). Diante disso, muitos têm sido os esforços para ampliação dos investimentos em tecnologias que melhorem o sistema produtivo desta cultura, pois reduzir a dependência do petróleo é uma necessidade premente, não apenas por razões econômicas, mas principalmente estratégicas e ambientais.

Na safra 2015/16, o Brasil explorou uma área de 8.995,5 mil hectares com cana-de-açúcar, com uma produtividade média de 73,2 Mg ha⁻¹. Em relação à área total, o estado de São Paulo é o maior produtor, e cultiva mais da metade da área destinada a cultura (4.678,7 mil hectares). Em seguida, tem-se o estado de Goiás com 10,1% (908 mil hectares) e o estado de Minas Gerais com 9% (811,2 mil hectares) ocupa a terceira posição. Em relação à produtividade, o estado de Goiás é o mais produtivo com 78,6 Mg ha⁻¹, seguido de perto por Mato Grosso do Sul e Minas Gerais com 78,2 e 76,9 Mg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2015).

Nas áreas tradicionalmente exploradas com a cultura de cana-de-açúcar, a produção é basicamente fundamentada no cultivo de sequeiro ou com irrigação de “salvação” por ocasião do plantio ou início da brotação nas soqueiras. Com relação às áreas de expansão do setor sucroenergético, na região Oeste de São Paulo e nos estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, Bahia, Tocantins, Maranhão e Piauí, onde podem ocorrer períodos maiores e mais intensos de déficit hídrico no solo, ao longo do ano, é de fundamental importância considerar a tecnologia da irrigação para obtenção de produtividades econômicas.

De acordo com Dalri e Cruz (2002), a irrigação sempre esteve presente na agricultura tecnificada, pois é uma ferramenta que permite auferir maiores produtividades, melhor qualidade do produto, e independência do fator precipitação, propiciando às culturas, uma verticalização da produção. No entanto, a água para a irrigação é um recurso limitado, o que faz com que sua gestão eficaz seja fundamental, não só na redução do uso e minimizando

desperdícios, mas também na contenção dos custos de produção, de forma a manter a sustentabilidade do sistema (SILVA et al., 2007).

Dentre as ferramentas disponíveis para minimizar o uso da água na agricultura irrigada, a técnica de irrigação sob déficit pode se tornar uma escolha acertada para a cana-de-açúcar, desde que sejam investigadas as fases fenológicas e épocas de cultivo onde a limitação da oferta de água não implique em reduções antieconômicas no rendimento da cultura.

A cana-de-açúcar, a exemplo de outras espécies, responde de forma diferente ao déficit hídrico durante suas diferentes fases fenológicas. Estudos conduzidos por Robertson e Donaldson (1998), Inman-Bamber e Smith (2005) e Olivier et al. (2006) indicaram claramente que o déficit hídrico durante a fase de maturação, resultou em economia de água e em aumento no teor de sacarose. Por esta razão, é prática comum em cultivos irrigados suspender a irrigação antes da colheita, obtendo-se como vantagem adicional, redução na biomassa que será levada para usina, o que por sua vez, propicia diminuição nos custos com transporte (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Além da fase de maturação, estudos como os desenvolvidos por Roberts et al. (1990) e Robertson et al. (1999) apontaram para oportunidades de se economizar água também nas fases iniciais do ciclo de crescimento da cana-de-açúcar. Estes autores relataram um crescimento compensatório aparente de plantas de cana depois de experimentarem um período de déficit hídrico na fase inicial da cultura, desde que, posteriormente, as necessidades de água sejam plenamente atendidas.

Ao contrário dos estádios iniciais e finais do desenvolvimento da cana-de-açúcar, as fases intermediárias, mais precisamente nas que ocorrem o alongamento do colmo e o estabelecimento do dossel da cultura, a planta de cana não tolera déficit hídrico no solo, tendo sido relatado reduções significativas tanto de sacarose quanto na produtividade de colmos (CHAUDHRY; LEME, 1996, PENE; EDI, 1999).

Diante do exposto, é evidente a existência de uma ampla faixa de sensibilidade ao déficit hídrico para a cana-de-açúcar, sendo provável que o grau de limitação da produção por este tipo de estresse varie entre genótipos, conforme mencionado por Silva et al. (2007). Dessa forma, acredita-se ser importante o estudo comparativo entre diferentes variedades, submetidas às mesmas condições hídrico-restritivas, para o conhecimento e entendimento das variáveis de crescimento da cana-de-açúcar, com o intuito de identificar o material de maior eficiência na conversão de água em biomassa, visando assim à otimização desse recurso (MASCHIO, 2011).

A partir disso, a hipótese que norteia esse trabalho, é a de que existe uma estratégia de irrigação sob déficit, que associada a uma cultivar com características varietais específicas, possibilite a expressão de indicadores de produtividade tão satisfatórios quanto os obtidos em condições de irrigação plena. Nessa linha, os objetivos da pesquisa foram: *i*) estudar a influência de diferentes condições de disponibilidade hídrica sobre a dinâmica da área foliar em oito variedades de cana-de-açúcar durante o ciclo da cana-soca; *ii*) quantificar o acúmulo e particionamento de biomassa em diferentes variedades de cana-de-açúcar, sob diferentes condições de disponibilidade hídrica para o ciclo da cana-soca; e *iii*) apresentar índices de Produtividade da Água para biomassa, açúcar e etanol de 1ª e 2ª geração à literatura, para cada variedade estudada e em dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca), com base nos tratamentos de disponibilidade hídrica impostos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar: origem, história e importância

A cana-de-açúcar é uma planta perene, própria de climas tropicais e subtropicais e que pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*. Este possui várias espécies, porém, as canas atualmente cultivadas, em sua maioria, são materiais híbridos.

Dentre as várias espécies pertencentes ao gênero *Saccharum*, a que é explorada economicamente é um híbrido das espécies *Saccharum officinarum*, *Saccharum barberi*, *Saccharum robustum*, *Saccharum spontaneum*, *Saccharum sinensis* e *Saccharum edule*. A *Saccharum officinarum* é utilizada como base para o melhoramento genético, devido à capacidade de acumular altos níveis de sacarose no colmo; entretanto, possui baixa resistência a doenças. Normalmente, a espécie *Saccharum spontaneum* é utilizada como repositório de genes de resistência, vigor, perfilhamento e capacidade de rebrota para as novas variedades (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008).

O centro de origem da cana-de-açúcar tem sido reportado por diversos autores (BARNES, 1974; DANIELS; ROACH, 1987; CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al. 2011), que acreditam que a cultura seja nativa do sudeste da Ásia, embora o local exato ainda seja incerto. Segundo Shape (1998), a cana-de-açúcar já é conhecida a cerca de 2200 anos, e os primeiros registros são de áreas ao leste da China, na região de Pequim, tendo em seguida sido levada para a Índia, e de lá para a Península Arábica. Foi a expansão muçulmana do século VII a responsável pela introdução da cana em áreas onde esta não era cultivada, mas apenas no século seguinte que a cultura entrou na Europa, tendo partido dali para as Américas.

No Brasil, a cana-de-açúcar só chegou em meados do século XVI pela necessidade de se colonizar, defender e explorar as riquezas deste território – até então, sem tanta importância econômica para Portugal. Vários foram os motivos para a escolha da cana, entre eles, a existência no Brasil do solo de massapê, propício para este cultivo. Além disso, o açúcar era àquela época um produto muito bem cotado no comércio europeu, em crescente consumo e capaz de gerar valiosos lucros, transformando-se assim no alicerce econômico da colonização portuguesa no Brasil entre os séculos XVI e XVII (RODRIGUES, 2010).

Desde aquela época, muitas foram as conquistas alcançadas pela cultura, sendo elas bastante significativas por ocasião da criação do Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL) em 1975, e também 30 anos depois com o início da comercialização dos

veículos com motores *flex-fuel*. A demanda por etanol resultante do uso desta tecnologia, associada com o aumento crescente no consumo de açúcar, tem estimulado a criação de variedades adaptadas aos mais diversos ambientes e ao manejo agrícola em grande escala, o que tem permitido que a agroindústria canavieira se expandisse e se firmasse como uma importante fonte de riqueza ao longo de todo último século (MATSUOKA et al., 2012).

Atualmente, com aproximadamente nove milhões de hectares plantados com cana-de-açúcar na safra 2015/2016, o Brasil é o maior produtor mundial da cultura, seguido por Índia e China (CONAB, 2015). É também do país a liderança na produção de açúcar e etanol a partir desta cultura.

Dentre os maiores estados produtores de cana-de-açúcar no país, São Paulo destaca-se como maior produtor, com 350,6 milhões de toneladas em uma área de 4,7 milhões de hectares, correspondente a 52% da área total cultivada com cana-de-açúcar no país. Na sequência, estão os estados de Goiás (10,1% - 908 mil hectares), Minas Gerais (9% - 811,2 mil hectares), Mato Grosso do Sul (7,5% - 677,9 mil hectares), Paraná (6,6% - 596 mil hectares), Alagoas (3,8% - 338,6 mil hectares) e Pernambuco (2,9% - 264 mil hectares) (CONAB, 2015).

O setor sucroalcooleiro apresenta grande importância para o país, movimentando cerca de 80 bilhões de dólares por ano e com uma produção de 50% do mercado mundial de açúcar (NEVES et al., 2009). De acordo com o Procana (2015), o setor foi responsável por aproximadamente 2% do PIB nacional e por 31% do PIB da agricultura no Brasil em 2012, tendo empregado cerca de 4,5 milhões de pessoas.

Além da importância econômica, a cana-de-açúcar tem um papel ambiental de destaque, uma vez que o etanol, um dos seus subprodutos, é uma das melhores alternativas para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, haja vista que a sua queima como combustível reduz em cerca de 70% a emissão de CO₂ na atmosfera em relação à gasolina (EMBRAPA, 2014). O reconhecimento do etanol como combustível renovável também tem contribuído para o crescimento da demanda por esta cultura (GOLDEMBERG et al., 2008).

Outro subproduto da cana-de-açúcar que tem ganhado importância ultimamente é a bioeletricidade, obtida a partir de processos de cogeração. Este subproduto, somado ao etanol lignocelulósico, que em breve se tornará viável para exploração em escala comercial, aumentará a relevância do já importante setor sucroalcooleiro no cenário energético brasileiro. Embora o pacote tecnológico da produção de etanol de biomassa necessite de investimentos importantes, o seu estabelecimento significaria uma diversificação estratégica para o agronegócio da cana-de-açúcar. A diversidade de produtos possíveis, incluindo produtos de

maior valor agregado como o diesel da cana, bioquerosene para aviação e biopolímeros, impulsionaria a área química, com o desenvolvimento de bioprodutos, através do conceito de biorrefinarias.

2.2 Aspectos gerais da cultura

A cana-de-açúcar, *Saccharum* spp., é uma planta de metabolismo do tipo C4, alógama, de ciclo semiperene e elevada rusticidade, adaptada a ambientes com alta intensidade luminosa e térmica, além de ser eficiente na utilização de água (SEGATO et al., 2006). No tocante as regiões aptas ao seu cultivo, ela é preferencialmente explorada na faixa compreendida entre os paralelos 35°N e 35°S. Para as condições do Brasil, especificamente, as variações climáticas possibilitam colheitas anuais de setembro a abril, no Norte-Nordeste e de maio a dezembro, na região Centro-Sul (ALFONSI et al., 1987).

A planta de cana-de-açúcar se desenvolve caracteristicamente em forma de touceira e sua parte aérea, que é a de interesse comercial, é formada por colmos que se originam do desenvolvimento de perfilhos (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2006). O número de colmos é definido geneticamente pelas características inerentes ao genótipo, sendo cada um deles formado por nós e entrenós, havendo em cada nó uma gema, as quais são protegidas fisicamente pelas bainhas das folhas (CASTRO, 2000). Com relação ao sistema radicular, este é formado basicamente por três tipos de raízes: as superficiais, ramificadas e absorventes; as de fixação, mais profundas, e a raiz cordão (CASTRO, 2000).

O ciclo da cana plantada pela primeira vez, pode ser de 12 (cana de ano) ou 18 meses (cana de ano e meio) e este primeiro estágio do cultivo é chamado de cana-planta. Após o primeiro corte, os ciclos passam a ser de 12 meses e são definidos como cana-soca ou soqueira. Em média, o ciclo produtivo da cana-de-açúcar é de cinco a seis anos, com quatro ou cinco cortes.

No tocante a fenologia da cana-de-açúcar, basicamente são quatro os estádios de desenvolvimento, sendo eles: brotação e emergência; perfilhamento e estabelecimento da cultura; crescimento vegetativo e fase de maturação (BENDA, 1969; GASCHO e SHIH, 1983), conforme apresentado na Figura 1.

O primeiro estágio, compreendido pela brotação e emergência, varia de 3 a 5 semanas, conforme descrito por Aude (1993). A duração deste período é função do estado nutricional do propágulo, da posição da gema no colmo de origem e no sulco de plantio, da ocorrência de pragas e doenças, bem como de fatores climáticos. Nesta fase, iniciam-se atividades

meristemáticas nos primórdios radiculares e no poro da gema, culminando com o desenvolvimento das raízes do tolete e a emergência de um pequeno broto na superfície do solo, respectivamente (SEGATO et al., 2006).

Após a brotação das gemas, começam a se formar outros rebentos, dando início ao segundo estágio fenológico, o perfilhamento, o qual tem origem na porção subterrânea da planta. Segundo Bezuidenhout et al. (2003), perfilhamento é o processo de emissão de colmos, originários da base da planta ou da região axilar da folha basal por uma mesma planta. Câmara (1993) cita que é o perfilhamento que permitirá o estabelecimento do canavial a campo, e fornecerá às touceiras o número de colmos adequados à sua produção, chegando algumas variedades a produzir 25 ou mais colmos por touceira.

No tocante a dinâmica do perfilhamento, Silva et al. (2008) relatam que o aumento no número de perfilhos pode ocorrer até os seis meses após o plantio e, posteriormente, há uma redução nesse número ocasionada pela competição entre os perfilhos pelos fatores de crescimento (luz, espaço, água e nutrientes). Miller e Gilbert (2009) relatam que associado aos fatores ambientais, está o hormônio de crescimento auxina, o qual regula o processo de perfilhamento, sendo também responsável pelo alongamento do colmo e inibição do desenvolvimento de gemas laterais, garantindo a dominância apical.

Figura 1 – Estádios fenológicos da cana de açúcar

Fonte: Gascho e Shih (1983)

O terceiro estágio fenológico, período de crescimento intenso da planta de cana-de-açúcar, envolve os eventos de alongamento do colmo, com crescimento vigoroso e início do acúmulo de sacarose; começa a partir de 120 dias após o plantio e dura até os 270 dias em um cultivo de 12 meses. Nesta fase, considerada como a mais importante do cultivo, pois é quando ocorre a formação e o alongamento do colmo, o qual resultará em produção, o

desenvolvimento das plantas pode ser medido pelo crescimento da parte aérea da planta (altura e diâmetro dos colmos), o qual é influenciado por fatores bióticos (competição com plantas daninhas, variedades, ataque de fungos e pragas de solo e aéreas) e abióticos (clima, fertilidade do solo e época de plantio) (DIOLA; SANTOS, 2012).

O último estágio fenológico é o que engloba o processo de maturação, que se inicia aos 270 dias após o plantio e pode ser definido como o processo fisiológico que envolve a formação de açúcares nas folhas e seu transporte e armazenamento no colmo (WATT et al., 2014). Nesta fase, sem o dreno fisiológico dos colmos mais jovens, inicia-se o processo de acúmulo de sacarose nos entrenós basais dos colmos mais velhos até atingir a região do ponteiro ou ápice da planta.

De acordo com Segato et al. (2006), a intensidade de acúmulo de sacarose é fortemente influenciada pelas condições ambientais desfavoráveis ao crescimento e desenvolvimento vegetativo, tais como: as temperaturas mais baixas, os períodos de seca moderados e a carência de nitrogênio.

No que se refere às variedades de cana-de-açúcar, as mais atuais são produto, principalmente, do cruzamento entre as espécies *S. officinarum* e *S. spontaneum*; a primeira, a mais amplamente difundida, possui elevada capacidade de acumular sacarose no colmo e, a segunda, uma espécie mais vigorosa e adaptada a ambientes hostis, contribui para a transferência de genes de resistência a estresses bióticos e abióticos (MATSUOKA et al., 1999).

Segundo Machado Junior (2002) existem mais de 25 programas de melhoramento de cana-de-açúcar espalhados pelo mundo. A maioria deles mantém um grande número de clones selecionados de programas regionais, clones importados de outras estações e clones de espécies selvagens importados das coleções mundiais.

No Brasil, são três os programas de melhoramento genético para esta cultura, sendo eles: i) o Programa Cana do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), iniciado em 1933; ii) o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) que iniciou seus trabalhos em 1968 (como o COPERSUCAR) e; iii) o Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da RIDESA (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro), formado por Universidades Federais e com o início em 1971 como PLANALSUCAR. Além destas, pode-se incluir também a Vignis e a GranBio, ambas especializadas no melhoramento genético da cana energia.

Apesar de existirem grandes diferenças nos detalhes sobre como os programas de melhoramento no Brasil (e no mundo) conduzem suas atividades, há alguns pontos em

comum. Em essência, o melhoramento baseia-se na seleção e clonagem de genótipos superiores presentes em populações segregantes, que são obtidas por meio de cruzamentos sexuais entre indivíduos diferentes (ALMEIDA, 2010).

No que se refere as características de interesse para os programas de melhoramento genético, as mais pesquisadas variam em função do mercado e ao longo do tempo. Atualmente, do total de cana produzida, metade é destinada à produção de etanol e o restante para açúcar. Contudo, em virtude do recente interesse pela bioenergia gerada a partir de processos de cogeração nas usinas sucroalcooleiras, espera-se que em breve estejam disponíveis no mercado cultivares específicas para o atendimento desta nova demanda.

2.3 Dinâmica da área foliar

Na cana-de-açúcar, assim como na maioria das espécies vegetais, as folhas são responsáveis pela interação da planta com a atmosfera, trocando gases e vapor d'água através dos estômatos, os quais abrem-se e fecham-se em função da turgidez das células guardas (SCARPARI; BEAUCLAIR, 2008). Esta estrutura da planta está diretamente relacionada com a produtividade, pois são as folhas que interceptam a luz fotossinteticamente ativa para fazer a fotossíntese, produzindo carboidratos, direta ou indiretamente, em todos os processos vitais da planta (MUCHOW; CARBERRY, 1989).

No período inicial do desenvolvimento da cana, a maior parcela da matéria seca produzida é destinada ao crescimento das folhas. De acordo com Machado et al. (1982), até os 100 dias após o plantio, 70% da matéria seca produzida pelas plantas está alocada no tecido foliar. É o desenvolvimento das folhas que determina a área de interceptação da radiação solar e a dimensão do aparelho fotossintetizador; dessa forma, quanto mais rapidamente crescem as folhas e maior o período em que estas permanecem ativas, maior deverá ser a produtividade da cultura.

Para Hermann e Câmara (1999), o estudo da área foliar em cultivares de cana-de-açúcar é de fundamental importância, por permitir correlacioná-la com o seu potencial produtivo, seja em massa seca, quantidade de açúcar ou taxas de crescimento. O indicador habitualmente utilizado para avaliar o desenvolvimento do dossel é o índice de área foliar (IAF), o qual determina a relação entre a área foliar da planta e a área de solo disponível à mesma (LEME et al., 1984; PEREIRA; MACHADO, 1987).

Segundo Machado et al. (1982), no início do ciclo da cultura o IAF é pequeno, apresentando um crescimento lento, mas que aumenta rapidamente, até atingir um valor

máximo. A partir daí permanece praticamente constante ou pode diminuir em condições climáticas desfavoráveis. Os aumentos dos valores de IAF ocorrem em função tanto do aumento do número de folhas por colmo, como do aumento da área foliar individual.

De modo geral, não existe um valor ideal de IAF, tendo em vista que esse índice é bastante variável e é diretamente influenciado por fatores ambientais, nutricionais e sanitários. Os valores de IAF comumente encontrados na literatura, especificamente para a cana-de-açúcar, oscilam entre 2 e 7, sendo este último encontrado no estágio de máximo desenvolvimento vegetativo da planta. Valores de IAF similares a este foram verificados por San José e Medina (1970) e Keating et al. (1999), sendo eles iguais a 7,6 e 7,0, respectivamente.

No tocante ao efeito ambiental sobre o IAF, a disponibilidade hídrica, particularmente, é uma das principais responsáveis pela redução deste indicador, isto porque ela afeta de sobremaneira vários processos metabólicos da planta, tais como: a condutância estomática, fotossíntese e transpiração, o que inevitavelmente leva ao declínio da taxa de crescimento e por consequência a redução da área foliar (GOMES et al., 2004; PORTES et al., 2006).

Em estudos envolvendo o crescimento e desenvolvimento do dossel da cana-de-açúcar em condições distintas de disponibilidade hídrica, Robertson et al. (1999) encontraram valores máximos de IAF de 4,92 para a cultura irrigada e 4,11 para a cultura sob déficit hídrico, enquanto Farias (2001), avaliando o comportamento da cultura em regime irrigado e de sequeiro, verificou que, para a variedade SP 79 1011 irrigada, o IAF máximo foi de 6,48, e para a cana de sequeiro, foi de 6,33. A diferença encontrada por ambos, apesar de modesta, reflete a importância do adequado atendimento da demanda hídrica da cultura, para que se alcance produtividades satisfatórias.

2.4 Crescimento e acúmulo de biomassa

A análise de crescimento tem sido usada pelos pesquisadores de plantas com o objetivo de explicar as diferenças no desenvolvimento destas, podendo elas ser de ordem genética ou resultante de modificações no ambiente. Para a cana-de-açúcar, especificamente, a avaliação de variáveis morfológicas das plantas, tais como: a altura e o diâmetro de colmos, a área foliar e ainda, os componentes de produção como o rendimento de colmos, torna possível a identificação da capacidade produtiva e adaptativa de diferentes variedades, o que aumenta as chances de seleção dos melhores genótipos.

Adicionalmente, a análise de crescimento pode ser realizada por meio de avaliações sequenciais do acúmulo de matéria seca e/ou fresca ou, ainda, dos índices fisiológicos dela obtidos, tornando possível a identificação das prováveis variações no desenvolvimento da cana-de-açúcar que ocorrem durante o ciclo, cujo conhecimento é essencial para determinação dos melhores tratos a serem dispensados para a cultura, sejam eles de ordem hídrica, sanitária ou nutricional (GAVA et al., 2001).

De acordo com Machado (1982), o crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar pode ser dividido em três etapas, como segue: *i*) fase inicial, em que o crescimento é lento, indo do plantio até os 200 dias, durante a qual há acúmulo de 14% da matéria seca total a ser acumulada ao final do ciclo; *ii*) fase de crescimento rápido, entre 200-400 dias após o plantio, na qual 75% da matéria seca é acumulada; e *iii*) fase final, que dura entre 400-500 dias após o plantio, etapa onde o crescimento volta a ser lento e é responsável por 11% de toda a matéria seca.

Gava et al. (2001), estudando a variedade SP 80-1842 na região de Iracemápolis/SP, também dividiram o ciclo da cana em três fases e verificaram que na primeira fase de desenvolvimento, 0 a 60 dias após colheita (DAC), o crescimento foi lento e os perfilhos acumularam cerca de 6% da matéria seca total da parte aérea. Na segunda fase, 60 a 210 DAC, a planta apresentou taxa de crescimento elevada e acumulou aproximadamente 81% da matéria seca total. Na terceira fase, 210 a 299 DAC, que é a fase de maturação, houve um acúmulo de matéria seca em torno de 13%.

Tanto para o estudo de Machado (1982) quanto o realizado por Gava et al. (2001), Suguitani (2006) chama a atenção para o fato de que deve-se observar que os intervalos dependerão sempre da época em que se dá o início do ciclo e de como ocorrem as condições climáticas posteriormente. No entanto, outro aspecto que também deve ser considerado, é o da diversidade genética, tendo em vista que os dois materiais são de programas de melhoramento e épocas de lançamento distintas, o que possivelmente ajuda a explicar a desproporção na duração do ciclo e percentuais de acúmulo de biomassa obtido por ambos.

Para Inmam-Bamber et al. (2002), além do perfeito entendimento de processos como duração do ciclo e da quantidade de matéria seca acumulada em determinado estágio fenológico da cana-de-açúcar, é imperativo compreender também a maneira como ocorre o particionamento da biomassa entre as várias estruturas que compõe a planta, tendo em vista que a produção de açúcar, principal produto do cultivo da cana, depende diretamente da quantidade de fotoassimilados que é direcionada para os colmos, sendo neste armazenado na forma de sacarose.

De acordo com Takeda e Frey (1976), a relevância alcançada pelas estruturas vegetativas das plantas é determinada pela taxa de crescimento e duração do crescimento vegetativo, além do total de fotoassimilado distribuído para a porção de interesse econômico da planta, que no caso da cana-de-açúcar é representada pela fração dos colmos. Todas estas características, são potencialmente aumentadas em condições edafoclimáticas adequadas, no entanto, são aspectos inerentes ao genótipo cultivado.

Estudos sobre o particionamento da biomassa da cana-de-açúcar vêm sendo realizados com alguma frequência em várias partes do mundo. Em ensaio de campo conduzido por Robertson et al. (1996) na Austrália, por exemplo, estes encontraram particionamento da biomassa total da parte aérea de 0,80 para variedades de cana-de-açúcar que produzem acima de 5 kg m⁻². Já Inman-Bamber et al. (2002), em experimentos conduzidos na África do Sul mencionam valores máximos de partição para os colmos da ordem de 0,85 para variedades que produzem acima de 6 kg m⁻² sob condições tropicais. Valores mais modestos, da ordem de 0,66, foram observados por Evensen et al. (1997) em experimento com duas cultivares locais no Havaí.

A Tabela 1 apresenta uma coletânea de dados de fração do colmo para a biomassa total da cana-de-açúcar, obtida a partir de uma revisão realizada por Singels et al. (2005). Nesta, os autores listam as causas da variabilidade encontrada naqueles trabalhos, estando elas, basicamente, associadas a diferenças metodológicas na quantificação da fração palha.

Tabela 1 – Frações de biomassa total da parte aérea da cana-de-açúcar

Referência	Fração da biomassa no colmo	Observação
Robertson et al. (1996)	0,80	Baixa recuperação da palha
Rostron (1972)	0,65	--
Gosnell (1967)	0,59	--
Evensen (1997)	0,66	--
Thompson (1988)	0,69	--
Thompson (1991)	0,64 – 0,73	Depende do ciclo
Inman-Bamber et al. (2002)	0,85	Apenas biomassa verde
Singels et al. (2000)	<0,65	Valor máximo atingido na colheita
Singels e Inman-Bamber (2002)	0,66 – 0,91	--

Fonte: Singels et al. (2005)

Para as condições do Brasil, até onde se sabe, o único experimento similar aos realizados pelos autores supracitados, é o de autoria de Silva (2009), realizado no município de Juazeiro/BA, na região do Vale do São Francisco. A variedade estudada foi a RB 92579, conduzida no ciclo de cana-soca (segundo ciclo da cultura). Neste estudo a fração de biomassa acumulada no colmo foi identificada como sendo de 0,76, para uma produção de biomassa seca total da parte aérea igual a 6,65 kg m⁻².

2.5 Irrigação na cana-de-açúcar

O rendimento de colmos e posterior produção de açúcar e de etanol da cana-de-açúcar depende de boa disponibilidade hídrica no solo e também da qualidade e intensidade luminosa a qual a cultura está sujeita, pois, estes fatores exercem influência no crescimento vegetativo e maturação, uma vez que estabelecem relação direta com a fotossíntese, translocação e acúmulo de carboidratos nas folhas e colmos. Quando estas condições são combinadas com a quantidade adequada de nutrientes, e com escolhas acertadas de variedade, idade do corte, tipo de solo e clima, pode-se alcançar produtividades potenciais para a cana-de-açúcar (DANTAS NETO et al., 2006; SILVA et al., 2014).

No tocante apenas à disponibilidade hídrica, nem sempre as chuvas atendem à real necessidade de água das plantas; surge daí a importância da irrigação, a qual, quando bem planejada tem retorno produtivo inquestionável.

De acordo com Machado (2002), a irrigação pode ser definida como um conjunto de técnicas destinadas a deslocar água para modificar a capacidade agrícola de uma região visando proporcionar uma maior produtividade, em complementação às demais práticas agrícolas. Para a cana-de-açúcar, especificamente, o uso desta prática permite além do incremento na produtividade, maior longevidade das soqueiras. Adicionalmente a estes benefícios, Matioli (1998) associou outros, os quais chamou de benefícios indiretos, estando estes basicamente relacionados com a redução de custos no processo produtivo proporcionado pelo aumento da produtividade.

No estado de São Paulo, onde se observa a maior área plantada do país, praticamente toda a cana produzida é cultivada em condições de sequeiro, isto é, sem o emprego da técnica de irrigação. A tradição do cultivo de cana de sequeiro é alicerçada no paradigma de que a irrigação de cana-de-açúcar é economicamente inviável nas condições edafoclimáticas do estado de São Paulo (FRIZZONE et al., 2001). No entanto, quando bem manejada, a irrigação é capaz de permitir que a cultura expresse seu potencial genético de produção, desde que não ocorra déficit hídrico prolongado.

Em estudo conduzido por Gava et al. (2011), por exemplo, verificou-se incrementos na produção de colmos e açúcar, de 24% e 23%, respectivamente, na comparação entre o cultivo irrigado e o de sequeiro. No entanto, os resultados encontrados por Inman-Bamber e Smith (2005) e Oliveira et al. (2011), mostraram-se mais otimistas, tendo estes observados incrementos de produtividade superiores a 140%, ambos em condições de irrigação plena. A magnitude dos incrementos proporcionados pela irrigação, obviamente, vai depender do

regime de chuvas da região, e consequentemente do nível de déficit hídrico experimentado pela cultura, contudo, na maioria das situações, são sempre expressivas as produtividades alcançadas com a irrigação.

Para o cultivo da cana-de-açúcar irrigada é de capital importância definir os estádios de desenvolvimento da cultura a fim de otimizar a eficiência de aplicação da irrigação. Assim sendo, pode-se dividir o ciclo da cana de doze meses em quatro estádios de desenvolvimento, conforme citado por Salassier (2006):

- ✓ Brotação e emergência – 1 mês;
- ✓ Perfilhamento e estabelecimento da cultura – 2 a 3 meses;
- ✓ Desenvolvimento da cultura – 6 a 7 meses;
- ✓ Maturação – 2 meses.

Ainda segundo este autor, os dois primeiros estádios são os mais críticos ao déficit hídrico. O terceiro estágio (desenvolvimento) é responsivo à lâmina aplicada, mas o déficit hídrico não causa tantos prejuízos à produtividade quanto aos dois primeiros. Já o quarto e último estágio (maturação), responde positivamente ao déficit hídrico, podendo ocorrer redução no teor de açúcar caso haja excesso de umidade nesta fase. Dentre estas quatro fases, o consumo diário de água é maior no terceiro estágio, isso ocorre em função do maior índice de área foliar verificado nesta fase.

Para Scardua e Rosenfeld (1987), além do estágio fenológico, outros fatores promovem variabilidade na demanda hídrica da cana-de-açúcar, tais como: o ciclo da cultura (cana-planta ou soca), as condições climáticas e de solo, as diferenças varietais e ainda, a disponibilidade de água no solo.

Sobre o consumo hídrico da cana-de-açúcar, vários autores têm procurado determinar as necessidades hídricas da cultura, mas os resultados diferem significativamente, seja por causa dos métodos de determinação ou condições experimentais (casa de vegetação ou cultivo de campo) exploradas. De modo geral, o consumo anual da cultura varia entre 1.500 e 2.500 mm (DOOREMBOS; KASSAM, 1979), já o consumo diário, depende muito da demanda evapotranspirométrica, em função do mês e da região (variação temporal e espacial), e tem, normalmente, variado entre 2,0 e 6,0 mm dia⁻¹.

A Tabela 2 apresenta uma compilação da variabilidade no consumo diário de água para a cana-de-açúcar em diversas regiões do mundo.

Tabela 2 – Consumo hídrico da cana-de-açúcar, em diferentes regiões do mundo

Ciclo	Consumo de água (mm dia ⁻¹)			Local	Referência
	Mínimo	Médio	Máximo		
Planta	4,1	5,7	8,6	EUA (Havai)	Campbell et al. (1959)
Planta	2,3	--	6,1	África do Sul	Thompson et al. (1953)
Planta	1,8	3,7	5,7	África do Sul	Thompson (1965)
Planta e Soca	2,2	4,8	7,7	Taiwan	Chang e Wang (1968)
Planta	2,5	3,9	6,6	África do Sul	Thompson e Boyce (1971)
Planta	1,5	3,1	4,6	Filipinas	Early e Gregório (1974)
Planta e Soca	3,4	4,4	5,1	Argentina	Fogilata (1974)
1ª Soca	2,5	3,9	7,8	África do Sul	Thompson (1976)
2ª Soca	1,8	3,6	5,9	África do Sul	Thompson (1976)
Planta e Soca	1,3	3,4	6,8	EUA (Flórida)	Shih e Gascho (1980)
Planta	0,5	2,5	6,0	Brasil	Barbieri (1981)
Planta	--	2,3	--	Taiwan	Chang et al. (1983)
1ª Soca	--	3,1	--	Taiwan	Chang et al. (1983)
2ª Soca	--	3,1	--	Taiwan	Chang et al. (1983)
Planta	2,7	3,3	3,7	Colômbia	Yang et al. (1985)
1ª Soca	1,2	4,7	7,5	Brasil	Silva (2009)
1ª Soca	1,2	3,7	7,1	Brasil	Carmo (2013)
Média	2,2	3,7	6,4		

Fonte: Adaptado de Peres (1988)

Comprovadamente, a cana-de-açúcar necessita de elevada disponibilidade de água durante o estágio vegetativo, a fim de apresentar rendimento adequado, sendo necessários de 150 a 200 litros de água para a produção de 1 kg de massa seca (CASTRO, 2000; MARIN et al. 2009). No entanto, acredita-se que um déficit hídrico controlado possa ser adotado sem provocar reduções significativas em seu rendimento, tendo em vista que a cana-de-açúcar pode suportar certo grau de deficiência hídrica sem que ocorram prejuízos na produção de biomassa e acumulação de sacarose (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Guazzelli e Paes (1997) estudaram a resposta de diversas variedades de cana-de-açúcar à irrigação, com uma lâmina equivalente a 75% da evapotranspiração potencial, obtiveram para as variedades RB 72454, SP 80-1842, SP 79-2233 e SP 80-1836 produtividades de 181, 170, 167 e 155 t ha⁻¹ de colmos industrializáveis, respectivamente. Estes rendimentos são similares àqueles obtidos em condições de irrigação plena, como foram os alcançados por Maule et al. (2001); Almeida et al. (2008) e Silva et al. (2014).

Resultados similares aos obtidos por Guazzelli e Paes (1997), só são possíveis de serem obtidos mediante a adoção de técnicas/estratégias de manejo de irrigação adequadas, e que sejam empregadas em cultivares de cana-de-açúcar que possuam características varietais que otimizem ainda mais a técnica. Nessa mesma linha, Carr e Knox (2011) afirmaram que novas formas de se manejar a irrigação têm sido desenvolvidas e propostas, mas poucos resultados têm sido aplicados.

Dentre as técnicas utilizadas para manejar a irrigação, especial atenção tem sido dispensada à irrigação sob déficit, a qual tem sido amplamente investigada como uma estratégia de produção valiosa e sustentável a ser utilizada em regiões secas ou sujeitas a períodos de déficit hídrico prolongado (GEERTS; RAES, 2009). A técnica prevê que ao limitar as aplicações de água apenas os estágios de crescimento mais sensíveis ao déficit hídrico, esta prática maximiza a produtividade da água e estabiliza – ao invés de maximizar – o rendimento.

Dessa forma, acredita-se que o manejo de irrigação adequado implica no conhecimento preciso da resposta da cultura ao déficit hídrico, o qual possibilita a identificação dos padrões de crescimento da cana-de-açúcar, que por sua vez, permite selecionar variedades edafoclimaticamente adaptadas aos diferentes ambientes de produção e que sejam eficientes no uso da água (OLIVEIRA et al., 2010).

2.6 Produtividade da água

Atualmente, a agricultura irrigada tem estado sobre pressão para produzir mais com as mesmas quantidades de água ou até mesmo reduzir sua demanda. Para tanto, faz-se necessário que os irrigantes utilizem de forma mais eficiente seus sistemas de irrigação, melhorando suas habilidades com o manejo da água e solo, como forma de reduzir sua demanda e uso de água. De acordo com Levidow et al. (2014), práticas que favoreçam a eficiência no uso da água, tem o potencial de melhorar a viabilidade econômica e promover a sustentabilidade ambiental da agricultura irrigada, sem necessariamente reduzir o consumo deste importante insumo.

Muitos pesquisadores têm proposto indicadores para avaliar a eficiência do uso de água (BOS et al., 1994; PERRY, 1996; MOLDEN et al., 1998; PEREIRA et al. 2012). Esses indicadores consideram a resposta produtiva da cultura e o desempenho da aplicação de água no sistema de produção em relação à demanda hídrica máxima requerida (PEREIRA et al., 2002).

A produtividade da água (PA) tem sido o indicador mais amplamente utilizado para expressar os benefícios derivados do consumo de água pelas culturas, podendo ser utilizado para avaliar o impacto das estratégias de exploração agrícola em condições de escassez de água (FRIZZONE, 2014). O termo PA foi originalmente importado da área econômica e tem sido habitualmente confundido com a eficiência do uso da água (EUA), entretanto, apesar da semelhança entre ambos, eles apresentam diferenças conceituais.

Para Ragab (2014), por exemplo, a EUA, por utilizar a palavra eficiência, deve ser apresentada na forma de razão ou porcentagem (que é a forma comum de apresentação dos indicadores de eficiência disseminados na área de engenharia), uma vez que representa a proporção de um elemento de saída dividido por um elemento de entrada, ambos com a mesma unidade. Por sua vez, a PA é um termo diferente, e refere-se ao que se pode produzir, seja físico ou econômico, a partir de uma unidade de entrada (para a água, em mm, L ou m³).

A interpretação do termo EUA apresentada por Ragab (2014), não é unânime na comunidade científica, particularmente para os fisiologistas de plantas, que utilizam o termo para analisar o desempenho das plantas, empregando a razão entre a assimilação de carbono e as taxas de transpiração. De fato, o argumento dos fisiologistas é interessante, e pode ser retratado na Equação 1, a qual considera que a produção de matéria seca (fotossíntese) e transpiração, estão relacionadas ao processo de difusão de CO₂ e de H₂O, que foi definida como EUA por Viets (1962) citado por Frizzone (2014).

$$EUA = \frac{\text{Taxa de produção de matéria seca}}{\text{Taxa de transpiração}} \rightarrow \frac{y \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})}{t \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})} \quad (1)$$

O que normalmente ocorre, é que nas práticas diárias de irrigação, a produtividade da água é um termo mais relevante que a eficiência de uso da água, cujo significado depende da aplicação. Dessa forma, integrando-se as taxas de produção de matéria seca e de transpiração ao longo do tempo, isto é, no ciclo da cultura, teremos Y (kg ha⁻¹) e T (mm), e a EUA passa a ser expressa pela produtividade física da água, mais comumente denominada de PA (VAZIFEDOUST et al., 2008), conforme a Equação 2:

$$PA = \frac{\text{Rendimento de biomassa}}{\text{Transpiração acumulada}} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1})}{T \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1})} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg)}}{T \text{ (m}^3)} \quad (2)$$

Quando a irrigação é realizada em escala de campo, ou até mesmo em cultivos conduzidos em ambiente protegido, geralmente é difícil distinguir a transpiração das plantas da evaporação das superfícies do solo e das plantas. Dessa forma, ao invés de usar T como base para a PA, utiliza-se a evapotranspiração da cultura (ET) (VAZIFEDOUST et al. 2008; PERRY et al. 2009), conforme é apresentado na Equação 3:

$$PA = \frac{\text{Rendimento de biomassa}}{\text{Evapotranspiração acumulada}} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1})}{ET \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1})} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg)}}{ET \text{ (m}^3)} \quad (3)$$

Sendo assim, a definição de PA pode ser dada, pela produção de matéria seca ou fresca da parte aérea (g ou kg), por unidade de terra (m^2 ou ha), por unidade de água transpirada (mm ou m^3), uma vez que a água transferida para a atmosfera por meio da evaporação, não participa dos processos de assimilação de carbono pela planta (STEDUTO et al., 2007a).

De acordo com Steduto et al. (2007b), existe uma margem considerável para melhorar a produtividade da água dos cultivos, sendo ela possível a partir da adoção de técnicas agronômicas e de gestão da água mais eficientes. Entre as várias sugestões enumeradas por esses mesmos autores, pode-se citar a irrigação sob déficit e também o uso de tecnologias de irrigação mais modernas (tais como os sistemas de irrigação localizada), além da utilização de cultivares mais responsivas a irrigação.

Os resultados apresentados na Tabela 3, obtida a partir de estudos realizados por Molden et al. (2010), mostram os níveis atuais da PA de diversas culturas, o que indica que as diferenças observadas em um mesmo produto, refletem os efeitos da gestão dispensada à cultura. De forma análoga, a Tabela 4 mostra como a eficiência de utilização de água associada com o uso da irrigação por gotejamento, em comparação com a irrigação por superfície, levou ao aumento da produtividade da água de um certo número de culturas na Índia.

Tabela 3 - Produtividade da água para diversas culturas

Cultura	Produtividade da Água ($kg\ m^{-3}$)
Trigo	0,2 - 1,2
Arroz	0,15 - 1,6
Milho	0,3 - 2,0
Tomate	5,0 - 20,0
Cebola	3,0 - 10,0
Amendoim	0,1 - 0,4
Batata	3,0 - 7,0

Fonte: Molden et al. (2010)

Tabela 4 - Ganhos de produtividade, em porcentagem, para várias culturas a partir da substituição do sistema de irrigação por superfície para o sistema de gotejamento

Cultura	Aumento no rendimento (%)	Redução na aplicação de água (%)	Ganhos na Produtividade da Água (%)
Banana	52	45	173
Algodão	27	53	169
Uva	23	48	134
Tomate	5	27	44
Cana-de-açúcar	23	44	121

Fonte: Molden et al. (2007)

2.7 Produtividade da água para a cana-de-açúcar

A produtividade da água é um ótimo indicador para a análise e tomada de decisão, pois permite avaliar a variação da razão entre a produção e a quantidade de água utilizada, sugerindo valores que maximizem sua utilização (MASCHIO, 2011).

Para a cana-de-açúcar, particularmente, Doorembos e Kassam (1979) definiram limites de produtividade da água para colmos, variando entre 5,0 e 8,0 kg m⁻³ de biomassa seca obtida a partir de cultivos irrigados, conduzidos em regiões tropicais e submetidos a condições adequadas de disponibilidade hídrica. Resultados similares foram registrados por Inman-Bamber et al. (1999), em experimentos conduzidos também em região tropical, no nordeste da Austrália, onde esses autores obtiveram valores de PA variando entre 19 e 27 kg m⁻³ (biomassa de colmos frescos), em regimes de irrigação complementar e plena, respectivamente.

Para Inman-Bamber e Smith (2005), o incremento da PA verificado em cultivos com adequada disponibilidade hídrica é atribuído à melhoria na partição da biomassa para os colmos. No entanto, é sabido que a variabilidade deste indicador depende também da variedade cultivada, ciclo de cultivo (cana-planta ou cana-soca), condições ambientais e práticas de manejo dispensadas a cultura (SMIT; SINGELS, 2006). Kigston (1994), por exemplo, em uma revisão sobre o tema, verificou que a PA variou de 8,37 a 20,94 kg m⁻³, já Robertson e Muchow (1994), relataram valores variando entre 4,8 e 12,1 kg m⁻³ e, em outro trabalho, Robertson et al. (1996) observaram variação de 5,3 a 15,4 kg m⁻³, todos com valores de PA expressos como biomassa fresca de colmos.

Para diversos autores (ALI; TALUKDER, 2008; VAZIFEDOUST, et al., 2008; GEERTS; RAES, 2009), além dos motivantes de variabilidade da produtividade da água supracitados, deve-se atentar também ao termo utilizado para expressar o denominador da equação de PA, tendo em vista que esse pode apresentar-se como originário apenas da água advinda da irrigação ou precipitação, da soma de ambos e, ainda, exclusivamente da transpiração. Dessa forma, diferentes metodologias de quantificação da água utilizada pela cultura, necessariamente implicam em diferentes valores de PA obtidos.

Apesar da diversidade de trabalhos com PA para cana-de-açúcar existentes na literatura internacional, no Brasil este tipo de abordagem ainda é incipiente. Um dos poucos trabalhos foi o desenvolvido por Maschio (2011), que obteve valores de PA para colmos frescos variando entre 17,17 a 29,21 kg m⁻³, quando avaliava 24 cultivares de cana-de-açúcar nacionais em ambiente protegido. As condições de disponibilidade hídrica exploradas por

esse autor, foi a de tratamentos de irrigação com lâminas de 70 e 100% da evapotranspiração das variedades. Os resultados encontrados por Maschio (2011) em cultivo de primeira soca, e no ano seguinte por Leal (2012), no mesmo experimento, apontaram que, em média, o tratamento hídrico-restritivo apresentou os maiores valores de PA.

A despeito dos resultados verificados por esses autores, Ali e Talukder (2008) relatam que valores de produtividade da água altos, têm pouco ou nenhum interesse se eles não estiverem associados com rendimentos elevados ou aceitáveis, uma vez que a irrigação sob déficit, normalmente, estabelece uma relação de troca: uma menor produção para uma maior PA. O que se espera, de modo geral, é que o decréscimo promovido no rendimento da cultura, associado a economia de água gerada na irrigação sob déficit, compense financeiramente a estratégia de gestão da água adotada.

Diversos autores (De WIT, 1958; TANNER; SINCLAIR, 1983; STEDUTO et al., 2007a) tem demonstrado que para uma determinada variedade de cultura e clima, há uma bem estabelecida relação linear entre biomassa e transpiração da planta, ou seja, uma maior produção de biomassa demanda uma maior quantidade de água. Steduto et al. (2007a), citam que os pioneiros em observar este comportamento foram Briggs e Shantz em 1913, ocorrendo apenas 70 anos depois uma análise detalhada desse aspecto, que foi realizada por Tanner e Sinclair (1983), os quais foram responsáveis por fornecer uma base teórica e confirmaram a constância observada anteriormente para um determinado ambiente. Contudo, poucas foram as tentativas feitas com o objetivo de combinar avanços científicos com novas evidências experimentais para melhorar a compreensão do comportamento da PA, tendo em vista sua grande importância no manejo das culturas e também para o desenvolvimento de modelos para estimativa de produção.

Para Molden et al. (2010), embora haja uma relação fixa entre a biomassa e a transpiração, existe uma variabilidade substancial nos fatores que podem melhorar a relação entre o rendimento e a transpiração, tais fatores incluem: redução da componente evaporação da ET, melhoria no índice de colheita, condições climáticas adequadas, cultivares melhor adaptadas, gestão do estresse hídrico, controle de pragas e doenças, manejo nutricional e do solo, e outras práticas agronômicas existentes. Dessa forma, diante de todos os fatores elencados por esses autores, parece haver espaço considerável para elevar o rendimento em relação a evapotranspiração.

Na Figura 2, elaborada a partir do estudo de Molden et al. (2010), esses autores sintetizam graficamente os ganhos de PA auferidos no passado e expectativas futuras de incremento para essa variável em diferentes condições de manejo para as culturas agrícolas de

modo geral. A curva superior, presente no gráfico, representa a relação biofísica existente entre a biomassa e transpiração, onde, possivelmente, pouco ganho possa ser alcançado neste aspecto. No entanto, quando se considera a relação estabelecida entre rendimento e transpiração (linha tracejada), o melhoramento genético, principalmente, tem contribuído de sobremaneira na promoção de melhorias substanciais, em partes, devido a mudanças no índice de colheita de muitas culturas. As duas últimas linhas, indicam que a melhoria na PA é possível através de uma melhor gestão, de modo a aumentar a proporção do rendimento em relação a ET. No entanto, essa melhoria tem diferentes níveis de aumento para as diversas regiões produtivas do mundo, sendo maior em países onde as mais modernas tecnologias agrícolas ainda não foram implementadas, e menor na Europa, América do Norte e Austrália. Nessas últimas, o aumento nos rendimentos implicará necessariamente, no aumento da ET.

Figura 2 – Ganhos de produtividade da água (PA) no passado e expectativas de incremento futura, para diferentes níveis de produtividade agrícola
Adaptada de Molden et al. (2010).

Ainda em relação aos valores de PA para a cultura da cana-de-açúcar, novos indicadores, derivados da PA baseada nos colmos, têm sido mensurados, considerando-se a importância econômica crescente destes produtos na atualidade. Esses indicadores são definidos como produtividade da água para açúcar, produtividade da água para biomassa total da parte aérea e também PA para o etanol de 1ª e 2ª geração.

Para a produtividade da água para açúcar, especificamente, Silva et al. (2011), em experimento com a variedade RB 92579, em Juazeiro/BA, obtiveram valores oscilando entre 0,69 e 1,22 kg m⁻³ em condições de irrigação plena. Já Leal et al. (2015), estudando 23 variedades de cana em ambiente protegido, encontraram valores médios de PA para açúcar de 2,0 e 2,11 kg m⁻³, para condições de disponibilidade hídrica iguais a 70 e 100% da demanda hídrica da cultura, respectivamente.

No tocante aos indicadores de PA para biomassa total da parte aérea e etanol de 1ª geração, poucos trabalhos têm apresentado resultados para eles, como os desenvolvidos por Leal (2012), que apresentou valores de PA para biomassa seca total da parte aérea variando entre 6,4 e 11,7 kg m⁻³, obtidos em duas condições de disponibilidade hídrica no solo. Em relação a produtividade da água para etanol de 1ª geração, Silva et al. (2011) e Andrade Júnior et al. (2012), encontraram valores para esta variável iguais a 0,49 e 0,48 L m⁻³, respectivamente. Quanto aos dados de PA para etanol de 2ª geração, até onde se sabe, não há na literatura informações a respeito desse indicador.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento apresentado nesta tese está vinculado ao projeto de pesquisa *FAPESP 2012/50083-7: "Produtividade da Água em Biomassa e Energia para Variedades de Cana-de-açúcar em Função dos Níveis de Irrigação: Experimentação e Simulação"*, aprovado em edital específico do Programa de Apoio à Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica (PITE) junto à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Assim, a metodologia adotada e os resultados apresentados foram definidos e redigidos em comum acordo, seguindo as cláusulas do Termo de Convênio de Cooperação firmado entre FAPESP, Odebrecht Agroindustrial (empresa parceira) e a Universidade de São Paulo - USP (Instituição sede do projeto).

3.1 Localização e caracterização da área experimental

A pesquisa foi realizada na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB), localizado na Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz’ (ESALQ/USP), em Piracicaba – SP (Figura 3). As coordenadas geográficas do local são: 22° 43’ 30” de latitude Sul, e 47° 38’ 00” de longitude Oeste, a altitude é de 546 m.

Figura 3 – Vista aérea do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ, com destaque para a casa de vegetação onde o experimento foi conduzido

Os experimentos foram conduzidos em infraestrutura do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Engenharia da Irrigação (INCT-EI), com base em uma casa de vegetação (ambiente protegido), composta por três vãos conjugados, com área total de 400 m² e altura do pé-direito de 5,2 m, cobertura plástica transparente (Ginegar Plastic Products® - Kibbutz

Ginegar, Israel) e laterais fechadas com tela “sombrite” preta, com aproximadamente 50% de interceptação da radiação global (Figura 4A). A estrutura é provida de um total de 396 vasos em concreto armado (333 litros/vaso) assentados sobre base de concreto (Figuras 4B e 4C).

Uma estufa anexa (Estufa de Apoio) com aproximadamente 110 m² também foi utilizada para abrigar os quadros de comandos do sistema de irrigação, conjuntos moto-bombas, sistemas de aquisição de dados (dataloggers), além de servir de apoio na realização das análises, colheita e armazenamento do material coletado (Figura 4D).

Figura 4 – Vista externa da estufa (A); Vista interna da estufa (B); Detalhe dos vasos – unidade experimental (C); Estufa utilizada como unidade de apoio, anexa a estufa principal (D)

O conjunto formado pelas duas estufas foi denominado de plataforma de pesquisa para Produtividade da Água na Conversão de Biomassa e Energia em Variedades Comerciais Atuais e Futuras de Cana-de-açúcar (PAC-CANA), de modo a otimizar o uso da água em projetos de irrigação.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

A pesquisa foi conduzida nos dois primeiros ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, sendo estes abordados nesta tese como Experimento 1, referente ao ciclo da cana-planta e, Experimento 2, referente a cana-soca.

O delineamento experimental adotado para ambos os ciclos foi o de blocos casualizados, com três blocos completos, sendo um bloco instalado em cada vão da estufa. Os tratamentos foram compostos por três fatores (4x4x8) em esquema de parcelas subdivididas (split-split-plot). Estas parcelas foram formadas por duas plantas (touceiras) alocadas em um vaso com aproximadamente 330 litros de solo (Figura 5).

Figura 5 – Detalhe da parcela experimental com as duas mudas de cana

No Experimento 1 foram estudados três fatores, sendo o primeiro e segundo com quatro níveis e o terceiro com oito (4x4x8), totalizando assim 128 tratamentos, sendo eles: 4 níveis de irrigação ao longo do ciclo (125, 100, 75 e 50% da Demanda Hídrica potencial - DHp); 8 variedades comerciais de cana-de-açúcar e 4 procedimentos de maturação, impostos por meio de variações na intensidade do déficit hídrico aplicado na fase de maturação.

Para o primeiro fator, os níveis de irrigação adotados foram determinados tomando como referência a demanda hídrica potencial de cada variedade, mantendo-se a umidade do solo do nível de referência (100%) sempre próxima a capacidade de campo (θ_{cc}); os demais níveis representaram 125%, 75% e 50% da lâmina de referência, ou seja, do tratamento que visava atender a toda demanda evapotranspirométrica das variedades. A diferenciação dos níveis de irrigação iniciou-se em fases distintas para os dois ciclos de cultivo. Para a cana-planta, optou-se por iniciar a diferenciação após a fase de intenso perfilhamento (~110 dias

após o plantio), tomando-se como fase crítica na determinação da produção (INMAN-BAMBER, 2004). Já para o ciclo da cana-soca, a diferenciação ocorreu aos 45 dias após o corte. Antes destes eventos, todo o experimento foi mantido em condições ótimas de disponibilidade hídrica (θ_{cc}). As Figura 6A e 6B apresentam a discriminação das lâminas de irrigação impostas aos tratamentos durante os dois ciclos de cultivo.

Figura 6 – Épocas de diferenciação das lâminas de irrigação impostas às variedades para os ciclos de cultivo. Cana-planta (A); Cana-soca (B)

Para a lâmina de 125%, houve alterações no projeto inicial, uma vez que, ao longo da primeira fase da pesquisa, percebeu-se que poderia haver uma “contaminação” das parcelas submetidas a lâminas restritivas, em virtude da proximidade destas. Dessa forma, optou-se por adotar uma lâmina com volume de água variável, mas similar ao do nível de 75% da DHp, de modo que, as plantas instaladas nestas parcelas fossem irrigadas com lâminas cada vez mais restritivas até se igualar àquelas dos tratamentos com lâmina de 75%. Assim, para os resultados referentes à lâmina de 125% adotou-se a denominação 75%*.

Quanto ao fator variedades, ressalta-se que, atendendo à cláusula terceira do termo de convênio de cooperação firmado entre FAPESP, Odebrecht Agroindustrial e USP (*"Respeitar e fazer respeitar as restrições à divulgação de informações e as limitações impostas por direitos autorais e de propriedade intelectual"*), as variedades foram codificadas aleatoriamente como V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8, respeitando o direito de

exclusividade para a empresa parceira do projeto. No entanto, ao final da redação dessa tese, e após sucessivas reuniões entre o coordenador do projeto e os agentes financeiros da empresa parceira, optou-se por liberar a decodificação das variedades, as quais podem ser consultadas na Tabela 5.

Tabela 5. Decodificação das variedades de cana-de-açúcar, com seus respectivos nomes comerciais e empresa responsável pelo melhoramento

Código	Variedade	Empresa de Melhoramento
V1	CTC15	CTC ¹
V2	CTC17	CTC
V3	RB867515	RIDESA ²
V4	RB92579	RIDESA
V5	RB931011	RIDESA
V6	RB966928	RIDESA
V7	IAC-5000	IAC ³
V8	NCo376	SASRI ⁴

¹Centro de Tecnologia Canavieira; ²Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético; ³Instituto Agrônomo de Campinas e ⁴South African Sugarcane Research Institute

Para o fator maturação, adotou-se quatro níveis de intensidade do déficit hídrico no final do ciclo da cana-planta, a saber: *i*) sem corte da irrigação no final do ciclo – ou seja, a irrigação foi mantida de forma inalterada até o final do ciclo; *ii*) corte gradual da irrigação, de forma moderada – neste tratamento, houve redução da lâmina aplicada 60 dias antes da colheita, sendo as restrições aplicadas apenas às lâminas de 100 (L100) e 75% (L75). Nessas, as reduções foram graduais para patamares de 80 e 60% para L100 e 60 e 45% para L75; *iii*) corte gradual da irrigação, de forma “drástica” – este tratamento foi similar ao anterior, sendo também aplicado 60 dias antes da colheita da cana-planta e imposto apenas para as lâminas de 100 e 75%. Nesse, o gradiente de redução foi de 80, 60, 40 e 30% para L100 e 60, 45, 30 e 22,5% para L75. Para o quarto e último nível, *iv*) aplicação da metodologia Australiana “*drying-off*” adaptada – originalmente proposta por Robertson et al. (1999). A modificação na estratégia consistiu na aplicação de déficit hídrico severo de curta duração, por meio da suspensão da irrigação 15 dias antes do início da colheita.

O critério para adaptação da metodologia Australiana foi estabelecido a partir da Equação 4, a qual relaciona o volume total de água disponível na parcela ($CAD = 60,0$ mm) com a evapotranspiração de referência média para o período, calculada pelo método de Penman-Monteith (2,5 mm).

$$TSI = \frac{CAD}{ET_o \cdot 2} \quad (4)$$

Em que:

TSI - tempo sem irrigação no final do ciclo, em dias;

CAD - capacidade de água disponível para a camada de 0,0 a 0,6 m, em mm; e

ET_o - evapotranspiração de referência média dos 30 dias anteriores ao corte da irrigação, em mm.

A Figura 7 apresenta a diferenciação das lâminas para os diferentes níveis do fator Maturação.

Figura 7 – Representação gráfica das frações das lâminas aplicadas durante a fase de maturação para os tratamentos com déficit hídrico moderado, déficit hídrico "intenso", sem déficit hídrico e a metodologia *dry-off* adaptada. *A lâmina referência é a lâmina do tratamento L100 de cada variedade

É importante ressaltar que, para os tratamentos de lâminas de irrigação nos níveis de 50 e 75%, não houve imposição dos tratamentos de Maturação, tendo em vista que a redução ainda maior na fração de água aplicada para esses tratamentos poderia ocasionar a perda/morte de algumas plantas, inviabilizando a continuidade do experimento com a cana soca. Informações adicionais para o efeito dos tratamentos de maturação sobre variáveis da cana-de-açúcar neste experimento podem ser encontrados em Barbosa (2015).

Para o Experimento 2, realizado no segundo ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, houve alteração apenas para o terceiro fator, dentre os que foram estudados no ciclo da cana-planta. Dessa forma, substituiu-se o fator Maturação por Épocas de Corte (o qual envolveu quatro épocas de amostragens ao longo do ciclo), mantendo-se inalterada toda abordagem metodológica adotada para o cultivo da cana-planta.

No tocante ao fator Épocas de Corte, realizou-se a colheita de um quarto do experimento a cada 90 dias, com a finalidade de mensurar o particionamento da matéria seca até o final de cada uma das quatro etapas. Com esta avaliação buscou-se estudar a distribuição da matéria seca entre as estruturas que compõe a planta (folhas, bainhas, hastes/colmos e desponte) com o intuito de subsidiar pesquisas do melhoramento genético, que visem a seleção de cultivares que apresentem maior eficiência em transformar o assimilado no produto de interesse.

As Figuras 8 e 9 apresentam os croquis para os dois experimentos (dois ciclos de cultivo) com os seus respectivos tratamentos distribuídos no delineamento de blocos aleatorizados.

3.3 Montagem da plataforma PAC-Cana

Para a condução do experimento foram necessárias algumas modificações e adaptações na estrutura original da estufa. Inicialmente, o nível do solo da estufa foi rebaixado em aproximadamente 0,80 m do nível original, ficando assim com dois níveis de piso no seu interior; um nível inferior no centro dos vãos e um nível superior nos corredores laterais de cada vão (Figura 10A).

A diferenciação do piso em dois níveis foi realizada com o intuito de facilitar as atividades de manejo da cultura de cana-de-açúcar, tais como: avaliações biométricas, monitoramento da tensiometria, monitoramento fitossanitário, colheita, dentre outras. Em cada um dos vãos, o nível inferior do solo foi impermeabilizado a partir da construção de duas rampas de concreto com altura de 0,10 m; a inclinação de ambas foi de 1% em direção ao centro do vão (Figura 10B). Entre as rampas foi mantido um corredor com aproximadamente 0,60 m de largura, o qual foi revestido com pedra brita de modo a facilitar a drenagem do excesso de água que pudesse ocorrer.

Como recipientes para as plantas foram construídos vasos em concreto armado com dimensões de 1,04 m de comprimento, 1,24 m de largura e 0,76 m de altura, resultando em um volume interno aproximado de 1,0 m³/vaso. Os vasos foram fabricados fora da estufa e posteriormente transportados e posicionados sobre a base de concreto no interior da mesma (Figura 10C).

Em cada vão da estufa, foram alocados 44 vasos, sendo metade deles posicionados em cada uma das duas rampas de concreto, perfazendo assim, 132 caixas em toda estufa. Na Figura 10D, observa-se o detalhe da distribuição dos vasos, que foram posicionados dois a dois, mantendo-se uma distância de 0,42 m como corredor lateral e 0,60 m como corredor central.

Figura 10 – Rebaixamento do solo no interior da estufa (A); Construção das rampas de impermeabilização e assentamento dos vasos (B); Posicionamento das caixas no interior da estufa (C) e Vista do interior da estufa com as caixas distribuídas

Para adequar a quantidade de vasos às características e ao número total necessário para as parcelas, os 132 vasos foram subdivididos em três partes iguais, totalizando 396 vasos menores (parcelas experimentais), com volume aproximado de $0,33 \text{ m}^3$ e dimensões de $1,04 \times 0,41 \times 0,76 \text{ m}$ de largura, comprimento e profundidade, respectivamente. A divisão foi feita por meio de placas de PVC e lona plástica, de modo a isolar e impermeabilizar cada parcela, evitando que as raízes e também a umidade de uma parcela não interferissem na parcela vizinha (Figura 11A). No fundo do vaso foi posta uma camada de pedra brita com $0,10 \text{ m}$ de espessura, revestida por manta geotêxtil (Bidim), para facilitar a drenagem e também isolar as parcelas (Figura 11B).

O enchimento dos vasos foi realizado com o auxílio de carrinho de mão e a quantidade de solo recebida por cada parcela foi igual ao seu volume (Figura 11C). Após o processo de enchimento, todas as parcelas receberam irrigação, de modo a promover a acomodação do solo, tendo em seguida sido realizada a complementação necessária para que a altura final no interior do vaso fosse de aproximadamente $0,60 \text{ m}$ (Figura 11D).

Figura 11 – Compartimentação realizada nas caixas/vasos (A); Detalhe dos compartimentos e revestimento montados com lona plástica e manta geotêxtil (B); Enchimento das caixas com auxílio de carrinho de mão (C) e Vista da estufa com todos os vasos preenchidos (D)

3.4 Solo e caracterização físico-químico-hídrica

A cultura foi conduzida em solo da série “Sertãozinho”, que é um Latossolo Vermelho Amarelo de textura franco arenosa. O solo foi distribuído em vasos de concreto armado (parcelas experimentais) com dimensões de 1,04 x 0,41 x 0,75 m de largura, comprimento e profundidade, respectivamente ($0,33 \text{ m}^3$), cultivados com duas mudas de cana-de-açúcar. Previamente ao ensaio, foram coletadas amostras deformadas utilizando trado de rosca, para a realização de análises químicas (Figura 12).

Figura 12 – Coleta de amostras deformadas de solo (A); preparação de amostra composta (B)

Foram coletadas amostras simples em todas as 396 parcelas da estufa, na camada de solo entre 0 e 0,30 m. Como o solo havia sido homogeneizado antes do transporte para a estufa, o volume coletado, teoricamente, representou o volume total de solo presente no vaso. As amostras simples foram agrupadas em três amostras compostas correspondentes aos 3 blocos descritos no delineamento experimental.

Ao final do ciclo da cana-planta, procedeu-se novamente com coletas de amostras de solo, de modo que, caso necessário, fossem efetuadas correções químicas, de forma que os dois ciclos ocorressem de maneira similar quanto ao fator fertilidade. As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados dos teores médios de macro e micronutrientes encontrados em cada um dos três blocos da estufa no início dos dois ciclos de cultivo.

Tabela 6 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes realizada nos três blocos do experimento para as épocas iniciais dos dois ciclos de cultivo

Bloco	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P _{resina} mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	CTC	V	m	S
							mmol _c dm ⁻³				%		mg dm ⁻³
CICLO DA CANA-PLANTA													
1	5,3 c	9,0	41,5 d	2,7 c	24,0 d	11,3 d	24,3	0,0	38,3	62,5	61,0 c	0,0	11,5 d
2	5,3 c	9,0	44,0 d	3,2 d	22,5 d	9,8 d	24,3	0,0	35,3	59,5	59,3 c	0,0	13,0 d
3	5,6 c	10,0	38,0 d	2,1 c	25,8 d	12,8 d	19,5	0,0	40,5	60,0	67,8 c	0,0	11,5 d
CICLO DA CANA-SOCA													
1	5,3 c	16,8	23,6 c	0,4 a	21,8 d	5,0 c	22,2	0,0	27,2	49,3	54,8 c	0,1	33,8 d
2	5,2 c	18,3	25,0 c	0,6 a	23,0 d	6,4 c	23,7	0,0	30,3	54,0	55,8 c	0,0	40,3 d
3	5,5 c	17,6	22,3 c	0,3 a	23,0 d	7,3 c	20,3	0,0	30,5	50,8	60,1 c	0,0	37,8 d

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P_{resina}); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio+alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); Saturação de Bases (V); enxofre (S). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos. IAC (2014) e Rajj et al. (1997)

Tabela 7 – Resultado da análise química do solo para micronutrientes realizada nos três blocos do experimento para as épocas iniciais dos dois ciclos de cultivo

Bloco	CICLO DA CANA-PLANTA				
	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	DTPA* (água quente)				
	mg dm ⁻³				
1	0,7 c	26,3 d	1,4 d	5,2 d	0,4 c
2	0,7 c	42,8 d	1,6 d	7,0 d	0,5 c
3	0,7 c	26,0 d	1,7 d	4,2 c	0,5 c
	CICLO DA CANA-SOCA				
	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	DTPA* (água quente)				
	mg dm ⁻³				
1	0,6 c	39,2 d	2,1 d	3,6 c	0,5 c
2	0,6 c	36,8 d	2,1 d	4,1 c	0,5 c
3	0,6 c	29,6 d	2,4 d	3,8 c	0,5 c

Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo IAC (2014) e Raij et al. (1997)

*ácido dietilenotriaminopentaacético

Para caracterização físico-hídrica do solo, foram coletadas amostras indeformadas, com o auxílio de trado tipo Uhland equipado com cilindros de aço inox de 50 cm³. As amostras foram retiradas em três profundidades, nas camadas de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente (Figura 13). Foram amostradas aleatoriamente quatro parcelas em cada bloco, resultando em 12 pontos de coleta e um total de 36 amostras na estufa. A determinação das curvas de retenção de água no solo se deu através de mesa de tensão (para tensões de 1, 2, 4 e 6 kPa) e extratores de “Richards” com placas porosas (para tensões de 10, 30, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa). Realizou-se também determinações da densidade global (Ds), densidade das partículas (Dp), porosidade total (PT) e análise textural. A caracterização físico-hídrica do solo pode ser observada na Tabela 8 e os parâmetros do modelo de van Genuchten para a curva de retenção de água do solo na Tabela 9.

Figura 13 – Coleta de amostras indeformadas de solo para realização de análises físico-hídricas

Tabela 8 – Caracterização físico-hídrica do solo ao término do primeiro ciclo de cultivo

Camada (m)	θ_{cc} $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_{pmp} $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	CAD (mm)	D_s g cm^{-3}	D_p g cm^{-3}	PT (%)	Frações granulométricas		
							Areia	Silte	Argila
							%		
0,00 – 0,20	0,224	0,161	22,10	1,61	2,69	40,1	72,29	8,00	19,71
0,20 – 0,40	0,226	0,163	19,62	1,58	2,69	41,2	72,03	8,04	19,93
0,40 – 0,60	0,229	0,166	18,49	1,54	2,69	42,7	72,03	7,69	20,28

θ_{cc} : umidade na capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 4,85 kPa). θ_{pmp} : umidade no ponto de murcha permanente (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 1500 kPa). CAD: capacidade de água disponível. D_s : densidade do solo. D_p : densidade de partículas do solo. PT: porosidade total do solo.

Tabela 9 – Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980)

Camada (m)	$\theta_s (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$a (1/\text{cm})$	m	n
0,00 – 0,20	0,493	0,161	0,0674	0,4471	1,8224
0,20 – 0,40	0,489	0,163	0,0744	0,4328	1,7680
0,40 – 0,60	0,507	0,166	0,0736	0,4471	1,8137

As análises físico-hídricas só foram realizadas ao término do primeiro ciclo, tendo em vista que no início do experimento o solo encontrava-se desestruturado, condição esta que não permite determinar com fidelidade a dinâmica da água nestas circunstâncias. Diante disso, para o manejo da irrigação durante o ciclo da cana-planta, adotou-se análises realizadas neste mesmo tipo de solo em experimentos anteriores, inclusive conduzidos por pesquisadores do mesmo grupo e linha de pesquisa. Após a realização das análises, houve comparação entre os resultados e observou-se semelhanças entre os mesmos.

3.5 Sistema de irrigação

As irrigações foram realizadas por gotejamento, com emissores equipados com sistema autocompensante, anti-sifão e antidrenante. Cada gotejador possuía vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ e foram instalados cinco emissores por parcela, sendo estes espaçados em 0,20 m, totalizando assim uma vazão de 8 L h^{-1} por parcela.

O tubo gotejador, com diâmetro interno de 16 milímetros, foi instalado no centro da parcela e para sua fixação fez-se necessário a adoção de estacas plásticas que permitissem a manutenção do tubo com os emissores voltados para cima, de modo a evitar o entupimento por partículas sólidas (FARIAS, 2013). Para fechamento das extremidades dos tubos, estes tiveram suas pontas dobradas e lacradas com arame de aço inox, e para diminuir o risco de danificar o tubo com o arame, em virtude do contato direto deste com o polietileno, optou-se por passar uma camada de fita isolante abaixo do arame (Figura 14A).

A alimentação dos tubogotejadores foi realizada por meio de microtubos que conduziam a água que supria o sistema. A comunicação destes com os tubogotejadores foi realizada a partir de cotovelos e conectores internos, ambos com diâmetro de 4,5 mm (Figura 14B).

Cada uma das 396 parcelas experimentais foi irrigada individualmente, com controle da água de irrigação realizado por meio da abertura e fechamento de microregistros instalados na estufa de apoio, localizada ao lado da estufa principal. Para facilitar o controle da irrigação, os microregistros foram agrupados em um painel de controle, o qual permitia o monitoramento simultâneo de todos os controladores/microregistros (Figuras 14C e 14D).

Para a pressurização do sistema foi instalado um conjunto motobomba KSB HYDROBLOC C1010[®] com potência do motor de 1,0 cv e pressão de 20,0 mca para vazão de 3,2 m³ h⁻¹ (Figura 14E). A motobomba utilizada apresenta uma curva característica (vazão x pressão) com pouca variação de pressão na faixa de vazão que foi utilizada para o experimento. Assim, mesmo com todas as parcelas abertas (3,2 m³ h⁻¹) ou apenas um tratamento aberto (três parcelas abertas com vazão de 0,024 m³ h⁻¹), a variação de pressão foi mínima, não exigindo grandes mudanças na abertura do registro de retorno.

A água utilizada na irrigação foi armazenada em duas caixas d'água com volume de 5,0 m³ (Figura 14F). Também foi acoplada ao sistema de irrigação duas motobombas, modelo GRUNDFOS CM3[®] com potência de 0,75 e 1,0 cv e carcaças e rotores em aço inox (Figura 14G), que foram utilizadas para pressurizar as soluções fertilizantes/defensivas quando foram realizadas as quimigações (fertirrigação/insetigação/fungigação). Para o preparo e armazenamento da solução fertilizante durante as aplicações, foi utilizada uma caixa d'água com capacidade de 0,5 m³, instalada paralelamente ao sistema no interior da estufa de apoio (Figura 14H). O sistema de irrigação também contava com chave de partida e sistema de filtragem de discos.

Quanto à automação do sistema, não houve tempo suficiente para implementação deste durante o ciclo da cana-planta, uma vez que a confecção e instalação do sistema desenvolvido só ocorreu no terço final do primeiro ciclo. Diante disso, optou-se pela operação manual do sistema por questões de segurança na condução do experimento. A operação manual foi precisa e bastante confiável, tendo como desvantagem requerer um maior tempo de dedicação dos pesquisadores na condução das irrigações do experimento.

Para o ciclo na cana-soca, a automação ocorreu de maneira parcial, tendo sido automatizada apenas a aquisição dos dados de tensiometria. Para tal, instalaram-se transdutores aos tensiômetros das parcelas experimentais, que por sua vez estavam conectados

a um circuito microprocessado, provido de conversor analógico/digital de 10 bits, sendo o mesmo comandado por um microcomputador. O gerenciamento da aquisição de dados foi realizado por um aplicativo supervisorio desenvolvido em linguagem Pascal, instalado no microcomputador. Os dados de tensão da água no solo obtidos nos sensores eram apresentados na tela de um computador em tempo real e armazenados em arquivo de texto para posterior processamento, o qual era realizado por meio da análise e tratamento dos dados, que em sequência eram utilizados para manejar a irrigação (Figuras 14I e 14J).

No tocante a avaliação do sistema de irrigação, a mesma foi realizada pela mensuração da vazão total de cada parcela experimental pelo período de cinco minutos (Figura 14K). Posteriormente, utilizou-se como indicadores de desempenho o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD). Para estes indicadores de desempenho, obteve-se valores de 95,0 e 93,3%, para o CUC e CUD, respectivamente, sendo o sistema avaliado como excelente, conforme classificação de Merriam e Keller (1978) e Mantovani (2002).

3.6 Sensores de solo e meteorológicos

Os sensores de solo instalados foram os tensiômetros, que serviram para o monitoramento do potencial mátrico do solo e subsequente manejo da irrigação. Os tensiômetros foram instalados imediatamente após o transplântio das mudas nas parcelas, em 3 repetições das oito variedades que foram manejadas com tratamentos de lâmina de 100%, servindo como referência para o manejo dos demais níveis de irrigação (Figura 14L). Uma bateria com três tensiômetros foi instalada no centro das parcelas e entre as duas plantas (Figura 14M) nas profundidades de 0,10 m, 0,30 m e 0,50 m, representando as camadas de 0,0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente. Dessa forma, foram utilizados 72 tensiômetros, com leituras realizadas manualmente com tensímetro de punção durante o ciclo da cana-planta e, por meio de transdutores de pressão no ciclo da cana-soca (Figura 14N).

Quanto aos sensores utilizados para o monitoramento dos elementos meteorológicos, estes foram instalados no centro da casa de vegetação, com o intuito de estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), assim como auxiliar na interpretação dos resultados alcançados. Desta forma, foram monitorados a densidade de fluxo ($W\ m^{-2}$) da radiação solar global (R_g), através de piranômetro de silício (LI200X - Licor), radiação fotossinteticamente ativa (RFA), através de sensor quântico (LI190SB - Licor) e radiação líquida (R_n), através de saldo radiômetro (NR^{LITE} - Campbell Sci.), assim como a temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%),

através de sensor Vaissala (HMP45C - Vaissala). Os sensores foram instalados no vão central em duas alturas (próximo ao teto da estufa e acima do dossel da cultura), e ligados a um datalogger (CR1000 - Campbell Sci.), armazenando-se os dados em intervalos de 15 minutos.

Figura 14 – Tubo gotejador (A); detalhe da alimentação dos tubogotejadores por meio dos microtubos (B); painel de controle da irrigação (C); detalhe dos microregistros controladores da irrigação individualizada (D); bomba principal do sistema de irrigação (E); reservatórios de água (F); bombas para realização da quimigação (G); tanques de preparação das soluções nutritivas e defensivas (H); sistema de aquisição dos dados de tensiometria (I); circuito microprocessado (J); avaliação do sistema de irrigação (K); instalação dos tensiômetros (L); bateria de tensiômetros (M); tensiômetros equipados com transdutores de pressão (N); estação meteorológica (O) e detalhe dos sensores dos elementos meteorológicos (P)

3.7 Condução dos experimentos

3.7.1 Plantio e transplantio das mudas

Os colmos que deram origem as mudas utilizadas na pesquisa foram obtidos junto a unidades experimentais que realizam o melhoramento genético das variedades adotadas neste estudo. Dessa forma, efetuaram-se coletas em campos do CTC (Piracicaba/SP), RIDESA (Araras/SP) e IAC (Ribeirão Preto/SP), com a garantia dos programas de origem de que se tratavam de colmos propícios para produção das mudas, ou seja, idade entre 10 e 12 meses, sem problemas de sanidade e principalmente, com a identificação correta da variedade fornecida. A exceção ficou por conta da variedade sul-africana, que foi coletada na Estação de Cruzamentos do CTC em Camamu/BA, e não no seu programa de origem.

Os colmos foram transportados em feixes identificados (Figura 15A), mas ainda com parte das folhas e bainhas, evitando dessa forma, danos as gemas. Dos colmos selecionados (Figura 15B), foram descartadas as gemas da base e ponteiro, sendo utilizadas para o plantio apenas as gemas do terço médio de cada colmo, uma vez que é esta porção do colmo que apresenta as gemas mais uniformes.

A metodologia de plantio utilizada foi semelhante à empregada e recomendada pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), denominada de sistema de Mudas Pré-Brotadas (MPB). Assim, com auxílio de uma guilhotina (Figura 15C), o terço médio do colmo de todas as variedades foi dividido em minitoletes de aproximadamente 4,0 cm com apenas uma gema (Figura 15D). Os minitoletes foram plantados no dia 31 de janeiro de 2013, em bandejas plásticas de 32 células (Figura 15E) com volume interno de 190,0 cm³ preenchidos com substrato comercial (Tropstrato[®]).

O número de mudas plantadas, foi cerca de 60% maior do que a quantidade necessária para condução do experimento, garantindo dessa forma, a possibilidade de seleção das plantas mais vigorosas e uniformes, e descartando aquelas que não possuíam estas características.

Durante o período de desenvolvimento das mudas, as bandejas foram instaladas sobre estrutura de telado suspensa de modo a facilitar o manejo das mesmas e também propiciar uma perfeita drenagem da água de irrigação (Figura 15F). Toda a fase de produção das mudas foi conduzida em casa de vegetação com cobertura plástica transparente e laterais fechadas com tela tipo sombrite com 30% de interceptação luminosa. As irrigações das mudas foram realizadas diariamente, de modo a manter a umidade do substrato sempre próxima da umidade na capacidade de campo, favorecendo assim o pleno desenvolvimento das mudas.

No decorrer da fase de mudas, houve monitoramento constante das plantas, de modo a identificar possíveis problemas sanitários e nutricionais que pudessem, posteriormente, dificultar o estabelecimento e desenvolvimento na fase seguinte ao transplântio. Para estes casos foram necessárias adubações foliares e aplicação de inseticida.

No que diz respeito apenas à adubação, adotou-se como fertilizantes os produtos Concorde[®], Improver[®] e Triunfo[®], que foram aplicados com auxílio de bomba costal aos 30 dias após o plantio. Para a solução defensiva, o inseticida utilizado foi o Certero[®], larvicida amplamente empregado para o controle de *Spodoptera frugiperda*, que foi a única praga de ocorrência na fase de mudas. A aplicação do inseticida ocorreu 20 dias após o plantio das gemas.

O transplântio das mudas foi realizado no dia 12 de março de 2013. Nesta data, as mudas se encontravam com altura média entre 0,30 e 0,40 m e número médio de três a cinco folhas expandidas. Estes valores foram apenas referenciais, de modo que, em função da variabilidade destes parâmetros para as diferentes variedades estudadas, optou-se pelo número de dias após o plantio da gema (40 DAP) como indicativo do momento de transplântio.

Foram transplantadas duas mudas por parcela (vaso de 0,33 m³). Para posicionar as mudas no centro da parcela e garantir que cada uma teria a mesma área de solo disponível dentro da parcela (0,21 m² planta⁻¹), foi utilizado um molde para marcação das covas (Figura 15G). Após a marcação, as covas que receberiam as mudas foram abertas com o auxílio de um trado do tipo holandês, com uma profundidade média de 0,15 m (Figura 15H). Assim, as mudas ficaram igualmente distribuídas com uma distância de 0,20 e 0,26 m das laterais da parcela e 0,52 m entre si (Figura 15I).

Previamente ao transplântio, o solo foi umedecido e teve sua umidade elevada para uma condição próxima a umidade da capacidade de campo, de forma a assegurar um melhor pegamento das mudas e também auxiliar na acomodação do solo revolvido para o transplântio, retirando possíveis bolhas de ar contidas entre o solo e as raízes (Figura 15J).

3.7.2 Manejo fitossanitário e nutricional

Durante todo o ciclo da cultura as plantas foram constantemente monitoradas de modo a assegurar a sua sanidade, garantindo que os efeitos dos tratamentos impostos não sofressem influência de fatores não mensurados no experimento.

Para o controle de plantas daninhas, as medidas adotadas foram sempre preventivas, de modo a não permitir que houvesse competição entre as plantas de cana e plantas invasoras,

que poderiam interferir, principalmente, no consumo hídrico da fase inicial de desenvolvimento das touceiras.

Previamente ao transplântio foi realizada capina manual em todas as parcelas, e logo após o estabelecimento das mudas, foi aplicado herbicida pré-emergente (DualGold® na dose de 2 L ha⁻¹), utilizando-se de uma bomba costal de 20 litros com protetor para pulverização (Chapéu de Napoleão). Esta aplicação se repetiu aos 66 DAP, e incluiu o herbicida seletivo Sencor 480®, na dose de 4 L ha⁻¹.

Para o controle durante o restante do experimento, foram realizadas apenas capinas manuais, em virtude da baixa infestação de plantas daninhas e da dificuldade de realizar pulverizações de herbicidas com o crescimento da cultura, podendo a aplicação não ser eficiente ou até mesmo promover fitotoxidez na cultura.

Quanto às pragas, houve incidência de lagartas (*Spodoptera frugiperda*), pulgões (*Melanaphys sacchari*) (Figura 15K) e ácaros (*Abacarus sacchari*), que foram controlados com Certero®, Actara® e Vertimec®, respectivamente. Quanto às doenças, estas não causaram danos ao experimento, ocorrendo apenas doenças secundárias ainda na fase de mudas e também a incidência de fumagina nas folhas (Figura 15L), decorrente da colonização de fungos nas secreções produzidas pelos pulgões. Para o seu controle, adotou-se o fungicida Ópera®, que possui amplo espectro de ação para as doenças que ocorreram na cultura.

Para o controle de pragas e doenças, optou-se por intervenções curativas, evitando pulverizações desnecessárias que aumentariam o risco de contaminação/intoxicação dos pesquisadores que constantemente se encontravam na área experimental. As aplicações de defensivos ocorriam sempre que se constatava a presença de pragas e/ou doença na área experimental e as pulverizações foram realizadas por meio de um sistema de microaspersão instalado no teto da estufa. O volume de calda defensiva aplicado em cada pulverização foi de cerca de 150 L.

No tocante às adubações, estas foram realizadas via fertirrigação e aplicação foliar, não havendo diferenciação quanto à demanda nutricional inerente a cada variedade; todas foram adubadas com base na mesma recomendação, tomando-se o devido cuidado para que nenhuma das variedades fosse submetida a qualquer restrição de nutrientes.

O pacote tecnológico de adubação utilizado foi o recomendado pela Produquímica®, utilizando-se produtos próprios para sistemas de fertirrigação, não prejudicando a vazão do sistema pelo baixo risco de entupimento.

Figura 15 – Colmos com presença de folhas e bainhas para transporte (A); Colmos limpos e selecionados (B); Guilhotina utilizada para corte dos minitoletes (C); Minitoleta com uma gema (D); Bandejas preenchidas com substrato (E); Detalhe da estrutura de telado suspensa (F); Molde utilizado para marcação e abertura das covas (G); Abertura das covas com trado tipo holandês (H); Distâncias entre plantas e as laterais do vaso (I); Vista geral das mudas transplantadas (J); Detalhe de folha infestada por pulgões (K) e Desenvolvimento de fumagina em secreções liberadas por pulgões (L)

Os produtos e doses utilizados durante os dois ciclos estão discriminados na Tabela 10, e as adubações (fertirrigação e aplicação foliar) foram realizadas com periodicidade mensal.

Tabela 10 – Relação de fertilizantes utilizados durante os ciclos da cana-planta e cana-soca com suas respectivas concentrações, dosagens e modalidades de aplicação

Produtos	Modalidade de Aplicação		Doses ¹	Ciclo	
	Via solo	Foliar		Cana-Planta	Cana-Soca
ProAcqua Inicial ^{®i}	x		500 g	x	x
ProAcqua Crescimento ^{®ii}	x		500 g	x	x
Improver ^{®iii}	x	x	20 mL	x	
Ácido Húmico	x		300 mL	x	x
Ever ^{®iv}	x		10 mL	x	x
Nitrato de Potássio	x		500 g		x
Nitrato de Magnésio	x		500 g		x
Octaborato de Sódio	x	x	20 g		x
Concorde ^{®v}		x	100 mL	x	x
Triunfo ^{®vi}		x	70 mL	x	x
CanaMicros ^{®vii}		x	130 mL	x	x
Kellus Copper ^{®viii}		x	7 g		x

¹ Doses aplicadas em cada evento de adubação/fertirrigação; ⁱ 12% (N), 40% (P₂O₅), 12% (K₂O), 0,03% (B), 0,05% (Cu), 0,1% (Mn), 0,02% (Mo), 0,1% (Zn); ⁱⁱ 20% (N), 10% (P₂O₅), 12% (K₂O), 0,03% (B), 0,05% (Cu), 0,1% (Mn), 0,02% (Mo), 0,1%; ⁱⁱⁱ 2% (Mo); ^{iv} 5% (N), 0,05% (Co), 8,5% (Zn); ^v 9% (N), 2% (P₂O₅), 1% (K₂O), 0,04% (B), 0,1% (Cu), 0,1% (Mn), 0,1% (Mo), 0,1% (Zn); ^{vi} 6% (N), 12% (P₂O₅); ^{vii} 1,5% (B), 0,4% (Mo), 4,5% (Zn); ^{viii} 14,5% (Cu)

As adubações foliares foram realizadas de forma análoga às aplicações de defensivos, sendo inicialmente realizadas pulverizações com bomba costal e, à medida que as plantas cresciam em altura, estas passaram a ser realizadas via sistema de microaspersão aérea.

Para as fertirrigações, os fertilizantes eram diluídos em aproximadamente 400 L de água, sendo esta solução injetada no sistema já pressurizado. Após a injeção de toda a solução fertilizante, era feita a injeção de água "pura" para limpeza do sistema e melhor distribuição dos fertilizantes no solo.

A avaliação do status nutricional das plantas foi realizada via análises de solução do solo, análises foliares (folha +1) e análises químicas do solo durante todo período experimental, estas ferramentas de monitoramento permitiram a adequada nutrição das plantas durante os dois ciclos de cultivo.

3.7.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado via solo, o qual buscou repor o volume de água consumido por cada uma das variedades estudadas. Para tanto, utilizou-se dados de tensão da água no solo, obtidos a partir de 72 tensiômetros instalados nas parcelas que receberam o tratamento de irrigação com lâmina de reposição igual a 100% da DHp.

O intervalo máximo entre as leituras foi de 2 dias, sempre coletando os dados no período da manhã, entre 7:00 e 8:00 h, quando a variação nos dados é menor em função da temperatura do ambiente (CAMARGO, 2012).

Os dados de tensão coletados a partir dos tensiômetros foram inicialmente transformados em potencial matricial da água no solo (ψ_m) (Equação 5), descontando-se a pressão equivalente à altura da coluna d'água existente no tensiômetro para cada profundidade medida. A pressão equivalente descontada foi de 3,0, 5,0 e 7,0 kPa para os tensiômetros instalados nas camadas de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente.

$$\Psi_m = L_t - h_c \quad (5)$$

em que:

ψ_m - potencial matricial da água no solo (kPa);

L_t - leitura do tensiômetro ou tensão da água no solo (kPa);

h_c - pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro (kPa);

Após obter os dados do potencial matricial da água no solo (ψ_m) foi calculada a média entre as leituras dos três blocos, obtendo-se dessa forma, um valor de tensão para cada camada e para cada uma das variedades (24 valores de ψ_m). Com estes valores foi estimada a umidade (θ), em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, através do modelo proposto por van Genuchten (1980) (Equação 6), que relaciona os valores de ψ_m com os respectivos valores de θ , utilizando os parâmetros característicos deste solo apresentados na Tabela 9.

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot |\Psi_m|)^n]^m} \quad (6)$$

em que:

$\theta(\psi_m)$ - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ_r - umidade volumétrica residual do solo, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

m e n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa^{-1} ; e

ψ_m - potencial mátrico, em kPa.

Assim, de posse dos dados de umidade estimados e a caracterização físico-hídrica do solo de cada camada (Tabela 8), foram calculadas as lâminas de irrigação necessárias para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo (θ_{cc}) para cada variedade do tratamento L100 (Equação 7).

$$L_x = (\theta_{cc} - \theta) \cdot Z \quad (7)$$

em que:

L_x - lâmina necessária para elevar a umidade da camada x até a capacidade de campo, em mm;

θ_{cc} - umidade volumétrica na capacidade de campo para a camada x , em $m^3 m^{-3}$;

θ - umidade volumétrica atual estimada para a camada x , em $m^3 m^{-3}$; e

Z - Espessura da camada x , em mm.

A somatória das lâminas necessárias de cada camada (Equação 8) resultou na lâmina de irrigação a ser aplicada para cada variedade.

$$LI = L_{0,0-0,2} + L_{0,2-0,4} + L_{0,4-0,6} \quad (8)$$

em que:

LI - lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, em mm;

$L_{0,0-0,2}$ - lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0,0 a 0,2 m até a capacidade de campo, em mm;

$L_{0,2-0,4}$ - lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0,2 a 0,4 m até a capacidade de campo, em mm; e

$L_{0,4-0,6}$ - lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0,4 a 0,6 m até a capacidade de campo, em mm.

Para facilitar o manejo da irrigação, foi utilizada uma planilha elaborada no Software Microsoft Excel®, que tornou prática e rápida à determinação do tempo de irrigação para cada tratamento de lâmina imposto. Para o cálculo do tempo de irrigação (Equação 9), adotou-se a vazão do sistema e área de solo da parcela de $8 L h^{-1}$ e $0,43 m^2$, respectivamente.

$$TI = \frac{LI \cdot A}{Q} \cdot 60 \quad (9)$$

em que:

TI - tempo de irrigação, em minutos;

LI - lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, em mm;

A - área de solo da parcela, em m^2 ; e

Q - vazão da parcela, em $L h^{-1}$.

Dessa forma, a lâmina de irrigação de cada variedade foi adotada como lâmina de referência, bem como o tempo de irrigação necessário para que houvesse a reposição hídrica. Para a irrigação dos demais tratamentos ($L50$, $L75$ e $L75^*$), foi calculada a fração do tempo de irrigação que deveria ser aplicada de acordo com o tratamento e fase do experimento, como descrito anteriormente no tópico Delineamento experimental e tratamentos.

3.8 Variáveis mensuradas nos experimentos

Para o ciclo da cana-planta as variáveis mensuradas foram aquelas relacionadas à qualidade e rendimento da cana-de-açúcar, com enfoque para a influência dos processos de maturação impostos por meio de diferentes intensidades de déficit hídrico. Já para o ciclo da

cana-soca, além dos parâmetros tecnológicos e de rendimento da cana, avaliou-se também a dinâmica da área foliar e o particionamento da matéria seca entre as várias partes que compõe a planta.

As avaliações para a segunda fase do experimento ocorreram a cada 90 dias e perfizeram um total de quatro mensurações, sendo cada uma delas realizadas em um quarto das parcelas experimentais.

As variáveis avaliadas serão descritas a seguir.

3.8.1 Área foliar

3.8.1.1 Determinação da área foliar (AF)

A área foliar está diretamente relacionada com a produtividade, pois é a estrutura responsável por interceptar a radiação incidente sobre a cultura, realizar fotossíntese e translocar o assimilado que é utilizado pelas outras partes que compõe a planta.

Nesta pesquisa a área foliar foi determinada com o auxílio de um integrador óptico da empresa LI-COR, modelo LI 3100 (Figura 16), que é um aparelho bastante preciso, apresentando resolução de até 0,01 mm². O aparelho foi utilizado apenas no 2º ciclo do experimento, por conta do prazo demandado entre a solicitação de compra e a entrega do mesmo ter se estendido até o final do 1º ciclo.

Figura 16 – Medidor de área foliar de bancada LI-3100C

As medidas de área foliar foram realizadas ao final de cada corte do ciclo da cana-soca, (um a cada 90 dias). As leituras foram tomadas em dois perfilhos representativos de cada parcela e cada folha destes foi digitalizada pelo aparelho individualmente, em uma ordem que partia da base da planta para o seu ápice (até a folha +1). Na sequência, os valores foram armazenados em uma planilha eletrônica a partir de um *laptop* conectado ao integrador, e foram registradas medidas de comprimento total da folha, largura máxima e média, além da medida de área foliar.

Para determinação da área foliar total das parcelas, utilizou-se equações geradas a partir da regressão entre área foliar e a massa seca das mesmas (Figura 17). A determinação da matéria seca das folhas foi obtida a partir da secagem do material fresco em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, por um período de 72 horas (Figura 18A).

De posse da equação que relacionava a área foliar das plantas amostradas com suas respectivas massas secas, procedeu-se com a estimativa da área foliar total da parcela, obtida a partir da massa seca total das folhas que integrava as touceiras da parcela. Esta abordagem metodológica tornou mais prática a determinação desta variável, uma vez que foi dispensado o uso do integrador óptico em todas as plantas das parcelas avaliadas, adotando-se apenas, uma balança digital com precisão de 0,01 grama (Figura 18B).

Figura 17 – Regressão entre área foliar e matéria seca das folhas para determinação do modelo matemático utilizado para estimativa da área foliar total das parcelas experimentais

Figura 18 – Estufa de secagem com circulação forçada de ar (A) balança digital de precisão (B)

3.8.1.2 Área foliar específica (AFE)

A área foliar específica expressa a razão entre área foliar e massa seca da folha, e é considerado um importante fator do ponto de vista fisiológico por descrever a alocação da biomassa da folha por unidade de área, refletindo a relação entre produção de biomassa e acúmulo de nutrientes (POORTER; GARNIER, 1999).

A determinação deste parâmetro foi estabelecida a partir do coeficiente angular das equações lineares obtidas pela relação entre área foliar e matéria seca das folhas. O coeficiente angular das equações lineares quando “forçado” a passar pela origem, tornam-se estimativas satisfatórias da área foliar específica, pois a área foliar é nula quando não existe uma massa expressa na variável x .

3.8.1.3 Fator de forma (FF)

Como análise complementar a determinação da área foliar a partir do integrador óptico, foi determinado o fator de forma das variedades avaliadas na pesquisa. Este fator é rotineiramente utilizado para estimativa da área foliar de diversas culturas, inclusive para a cana-de-açúcar; e é a razão da área foliar medida, pela área obtida a partir do produto entre o comprimento (C) e largura (L) máxima de folhas totalmente expandidas.

De maneira análoga à determinação da área foliar específica, adotou-se também para o fator de forma, o coeficiente angular da equação linear que relaciona a área foliar real pelo produto entre o comprimento e largura máxima das folhas. Conforme observado na Figura 19.

Figura 19 – Regressão entre área foliar e o produto entre comprimento e largura máxima das folhas para determinação do modelo matemático utilizado para determinação do fator de forma

3.8.1.4 Índice de área foliar (IAF)

O índice de área foliar corresponde à área da superfície total das folhas da planta por unidade de superfície de solo. Para determinação desta variável, adotou-se a relação entre a área foliar estimada a partir da metodologia apresentada no tópico 3.8.1.1 (Determinação da Área Foliar) e a área de projeção da copa das touceiras que ocupavam a parcela, a qual era de 0,62 m². O IAF foi determinado a partir da Equação 10.

$$IAF = \frac{AF}{AS} \quad (10)$$

Em que:

IAF - Índice de Área Foliar;

AF - Área foliar, m²; e

AS - Área de projeção da copa das touceiras, m².

3.8.2 Particionamento da Biomassa

O particionamento da biomassa das plantas de cana-de-açúcar foi realizado em cada uma das quatro etapas de corte previstas para o ciclo da cana-soca (colheitas a cada 90 dias), de modo a acompanhar a dinâmica do particionamento ao longo do ciclo da cultura. Para

tanto, adotou-se quatro componentes estruturais dos perfilhos, como sendo as frações responsáveis pela alocação de todo fotoassimilado armazenado na parte aérea das plantas.

Os componentes estruturais dos perfilhos compreenderam as folhas, as bainhas, o colmo e o desponte (Figura 20). Este último refere-se à seção do colmo acima de um ponto de quebra, onde se inicia a parte ainda em maturação, ou seja, onde há internódios em formação. O ponto de quebra é facilmente identificado pela facilidade de rompimento. Além do seguimento do colmo imaturo, formam ainda o desponte, folhas e bainhas em expansão.

Quanto ao fracionamento da planta, este ocorria imediatamente após a colheita, e consistia em separar os componentes principais de todas as plantas que compunha a parcela, e acondicioná-los em embalagens de papel. Posteriormente, todas as embalagens tinham sua massa fresca mensurada, e seguiam para secagem em estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 65°C, até atingir peso constante; para finalmente, terem sua massa seca determinada.

Figura 20 – Fracionamento da biomassa aérea das plantas de cana, em quatro diferentes componentes estruturais (folhas, bainhas, colmo e desponte)

Adicionalmente, realizou-se também a determinação da biomassa dos perfilhos mortos e improdutivos, que representam parcela significativa na biomassa total da parte aérea. Como perfilhos improdutivos, consideraram-se aqueles que não apresentavam colmo desenvolvido. A quantificação desta fração da touceira, se deu de modo análogo aos demais componentes estruturais dos perfilhos.

Os valores correspondentes a biomassa de cada componente estrutural das plantas possibilitou a determinação da biomassa seca total da parte aérea dos perfilhos. Inicialmente, os valores dos diferentes componentes foram expressos em porcentagem e depois em kg m^{-2} e

t ha⁻¹. Para as duas últimas formas de representação, as informações foram obtidas a partir da extrapolação dos dados de biomassa seca obtidos na área de influência das parcelas experimentais. Para tal fim, considerou-se a média entre a área de solo da parcela (0,43 m² parcela⁻¹) e também a área total disponível para o dossel, considerando os corredores (0,81 m² parcela⁻¹). Dessa forma, minimizou-se o risco de super e subestimativas para a primeira e segunda área, respectivamente. Assim, o valor de biomassa considerado/ajustado é o resultado da média entre os dois valores calculados anteriormente, representando o valor de biomassa média para a área útil ocupada pelo dossel das plantas da parcela (aproximadamente 0,62 m² parcela⁻¹). Esta metodologia foi adotada em função da dificuldade e incerteza nas extrapolações de cultivos em ambiente protegido para os padrões geralmente adotados no campo (efeito "bouquet"), ressaltando que o objetivo é a comparação dos tratamentos sob a mesma condição de cultivo, porém, mantendo os valores/parâmetros medidos dentro de uma ordem de grandeza aceitável.

3.8.3 Parâmetros tecnológicos do colmo

As colheitas que precederam as análises dos parâmetros tecnológicos dos colmos, tanto da cana-planta como da cana-soca, foram realizadas aos 381 DAP e 375 DAC, respectivamente. O período de realização das colheitas envolveu 12 dias para o primeiro ciclo e três dias em média para o segundo, tendo em vista que o experimento da cana-soca foi fracionado em quatro eventos.

Com o intuito de minimizar os erros experimentais do longo período de colheita (particularmente para o ciclo da cana-planta), o experimento foi colhido bloco a bloco (Figura 21), colhendo-se 32 parcelas (64 touceiras) por dia. Também se observou durante a condução do experimento que, mesmo com todos os cuidados de seleção das mudas, as duas touceiras formadas em algumas parcelas apresentavam comportamentos diferenciados de crescimento.

Figura 21 – Croqui dos sub-blocos de colheita na área experimental

Dessa forma, optou-se por coletar e analisar a biomassa de cada touceira individualmente, resultando num benefício direto para as análises estatísticas, com informações sobre a variabilidade entre as touceiras da mesma parcela e identificação de *outliers*.

O procedimento de colheita iniciou-se com a contagem dos perfilhos produtivos e perfilhos improdutivo da touceira (Figura 22A). Posteriormente a esta etapa, os perfilhos produtivos foram cortados e levados até uma bancada (Figura 22B) para retirada e separação dos componentes estruturais que compunham as plantas. Os colmos "limpos" foram pesados, amarrados em feixes e identificados (Figura 22C) seguindo posteriormente para análise tecnológica.

Para determinação das análises tecnológicas, utilizou-se a metodologia preconizada pelo CONSECANA (2006). Dessa forma, os colmos de cada parcela (duas touceiras) foram desintegrados e homogeneizados (Figuras 22D e 22E), obtendo-se a partir daí uma amostra representativa de cada parcela. Dessa amostra homogeneizada, pesou-se uma porção de 0,5 kg em balança analítica digital (Figura 22F), a qual foi submetida a uma pressão de 250 kgf cm⁻², durante um minuto, utilizando-se prensa hidráulica (Figura 22G).

Após a prensagem, foram obtidos dois produtos, o caldo (CA), que foi armazenado em Becker de 500 ml, e o bagaço úmido ou bolo úmido (BU), que foi armazenado em recipientes descartáveis de alumínio (Figura 22H). A partir do caldo extraído, procedeu-se com a determinação do brix, POL e Açúcares Redutores, através das metodologias descritas a seguir.

3.8.3.1 Análises do caldo extraído

3.8.3.1.1 Brix do Caldo

Com uma amostra do volume de caldo extraído, realizaram-se as medidas de Brix do caldo em °Brix, que representa o teor de sólidos solúveis por cento, em peso de caldo. Para esta análise, utilizou-se um refratômetro digital de bancada (Rudolph J47®) com correção automática de temperatura (20 °C) (Figura 22I).

3.8.3.1.2 Pol do Caldo

Para calcular a POL do caldo, inicialmente parte da amostra de caldo extraída foi levada para o processo de clarificação (Figura 22J). Para isso, utilizou-se aproximadamente

6,0 g da mistura clarificante à base de alumínio em 200 ml de caldo. Após agitação da mistura e filtragem, obteve-se o caldo clarificado (Figura 22K), no qual foram realizadas as leituras sacarimétricas - LPb (°Z), utilizando-se um sacarímetro digital (Figura 22L). Com os dados das leituras sacarimétricas, foi calculada a POL pela Equação 11.

$$POL_{\text{caldo}} = (1,00621 \cdot LAI + 0,05117) \cdot (0,2605 - 0,0009882 \cdot \text{Brix}) \quad (11)$$

em que:

POL_{caldo} - teor de sacarose aparente, por cento, em peso de caldo;

LAI - leitura sacarimétrica obtida com a mistura clarificante à base de alumínio, em °Z; e

Brix - brix do caldo, em °Brix.

3.8.3.1.3 Pureza Aparente do Caldo

Com os valores de POL e Brix dos itens anteriores, foi realizado o cálculo da pureza aparente do caldo pela Equação 12.

$$\text{Pureza} = \frac{POL_{\text{caldo}}}{\text{BRIX}} \cdot 100 \quad (12)$$

em que:

Pureza - pureza aparente do caldo, em %;

POL_{caldo} - teor de sacarose aparente, por cento em peso de caldo; e

Brix - brix do caldo, em °Brix.

Figura 22 – Colheita e análise tecnológica. Contagem dos perfilhos mortos/improdutivos (A); Limpeza dos colmos (B); Colmos amarrados, pesados e identificados (C); Colmos desintegrados em uma desfibradora da Engehidro, modelo DCE 2600® (D); Homogeneização em uma misturadora da Engehidro, modelo HCE-250® (E); Pesagem de amostra homogeneizada (F); Prensagem da amostra para extração do caldo (G); Caldo e bolo úmido (H); Determinação do brix com refratômetro digital de bancada da Rudolph, modelo J47®, (I); Processo de clarificação (J) Filtragem da mistura para obtenção do caldo clarificado (K) e Leituras sacarimétricas a partir de um polarímetro da Rudolph, modelo Autopol I (L)

3.8.3.2 Fibra da cana-de-açúcar

Para determinação da fibra da cana-de-açúcar optou-se pelo método de Tanimoto (Equação 13). Para isso, obteve-se o peso do bagaço ou bolo úmido (PBU) imediatamente após a prensagem do material e também o peso do bagaço ou bolo seco (PBS) após o material ser seco em estufa com circulação forçada de ar.

$$\text{Fibra} = \frac{(100 \cdot \text{PBS}) - (\text{PBU} \cdot \text{Brix})}{5 \cdot (100 - \text{Brix})} \quad (13)$$

em que:

Fibra - fibra da cana-de-açúcar, em %;

PBS - peso do bolo seco, em g;

PBU - peso do bolo úmido, em g; e

Brix - brix do caldo, em °Brix.

3.8.3.3 Açúcares Redutores da Cana

Para determinação dos açúcares redutores da cana (Equação 15), foram inicialmente calculados os açúcares redutores do caldo, pela Equação 14.

$$AR_{caldo} = 3,641 - (0,0343 \cdot Pureza) \quad (14)$$

$$AR_{cana} = AR_{caldo} \cdot (1 - 0,01 \cdot Fibra) \cdot (1,0113 - 0,00575 \cdot Fibra) \quad (15)$$

Em que:

AR_{caldo} - açúcares redutores do caldo, em %;

AR_{cana} - açúcares redutores da cana, em %;

Pureza - pureza aparente do caldo, em %; e

Fibra - fibra da cana-de-açúcar, em %.

3.8.3.4 Açúcar Total Recuperável

Para determinação do açúcar total recuperável (Equação 17), definido como medida para remuneração ao produtor de cana-de-açúcar, considerando-se as perdas industriais, foi inicialmente calculada a POL da cana-de-açúcar, pela Equação 16.

$$POL_{cana} = POL_{caldo} \cdot (1 - 0,01 \cdot Fibra) \cdot (1,0313 - 0,00575 \cdot Fibra) \quad (16)$$

$$ATR = (10 \cdot POL_{cana} \cdot 1,05263 \cdot 0,905) + (10 \cdot AR_{cana} \cdot 0,905) \quad (17)$$

Em que:

POL_{cana} - teor de sacarose aparente, por cento em peso de cana;

POL_{caldo} - teor de sacarose aparente, por cento em peso de caldo;

Fibra - fibra da cana-de-açúcar, em %;

ATR - açúcar total recuperável, em kg t⁻¹;

1,05263 - coeficiente estequiométrico de conversão da sacarose em açúcares redutores;

0,905 - coeficiente de recuperação, para uma perda industrial de 9,5%; e

AR_{cana} - açúcares redutores da cana, em %.

3.8.4 Umidade do Colmo

Para determinação da umidade do colmo, foi utilizada a Equação 18, que desconta da massa total do colmo a porcentagem de fibra e também de sólidos solúveis, chegando ao resultado da porcentagem de água presente no colmo.

$$\text{Umidade} = 100 - \text{Fibra} - \left[\text{Brix} \cdot \left(1 - \frac{\text{Fibra}}{100} \right) \right] \quad (18)$$

Em que:

Umidade - teor de umidade do colmo, em %;

Fibra - fibra da cana-de-açúcar, em %; e

Brix - brix do caldo, em °Brix.

3.8.5 Produtividade de Colmos por Hectare

Imediatamente após o corte e a limpeza, os colmos foram pesados em balança digital semianalítica, obtendo-se a biomassa fresca de colmos (BFC) de cada touceira. Para determinação dos valores de produtividade de colmos por hectare - TCH (t ha⁻¹) foi utilizada a extrapolação para a área média ocupada pelo dossel das plantas da parcela, conforme metodologia detalhada no item (Particionamento da Biomassa). A determinação desta variável foi estabelecida a partir da Equação 19.

$$\text{TCH} = \frac{\left(\frac{\text{BFC}}{0,43} \cdot 10 \right) + \left(\frac{\text{BFC}}{0,81} \cdot 10 \right)}{2} \quad (19)$$

Em que:

TCH - produtividade de colmos por hectare, em t ha⁻¹;

BFC - biomassa fresca de colmos, em kg;

0,43 e 0,81 - área de solo da parcela e área disponível para o dossel das plantas, em m²; e

10 - Fator para conversão de kg m⁻² para t ha⁻¹.

3.8.6 Rendimento Bruto de Açúcar

O cálculo do rendimento bruto de açúcar por área foi extrapolado com a Equação 20, levando-se em consideração os cálculos anteriores de TCH e de ATR.

$$\text{RBA} = \frac{\text{TCH} \cdot \text{ATR}}{1000} \quad (20)$$

Em que:

RBA - rendimento bruto de açúcar, em t ha⁻¹;

TCH - produtividade de colmos por hectare, em t ha⁻¹; e

ATR - açúcar total recuperável, em kg t⁻¹.

3.8.7 Produtividade da Água para Açúcar (PAA)

Para calcular a produtividade da água, foi necessário calcular a quantidade total de açúcar produzida em cada parcela (Equação 21) e estimar o volume total de água aplicado em cada parcela, somando-se todas as irrigações realizadas ao longo do experimento. De posse destes dados, a PAA foi calculada pela Equação 22.

$$AT_{\text{parcela}} = \frac{BFC}{1000} \cdot ATR \quad (21)$$

$$PAA = \frac{AT_{\text{parcela}}}{VT_{\text{irrigação}}} \quad (22)$$

Em que:

AT_{parcela} - total de açúcar produzido na parcela, em kg;

BFC - biomassa fresca de colmos, em kg;

ATR - açúcar total recuperável, em kg t^{-1} ;

PAA - produtividade da água para açúcar; em kg m^{-3} ; e

$VT_{\text{irrigação}}$ - volume total de água aplicado na parcela, em m^{-3} .

3.8.8 Produtividade da Água para Etanol de 1ª Geração

Para determinação da produtividade da água para etanol de 1ª geração, adotou-se como produto de conversão o álcool anidro, o qual foi estimado a partir do Açúcar Total Recuperável. De acordo com CONSECANA (2006), cada quilo de ATR produz 0,5665 L de etanol anidro. Dessa forma, adotou-se procedimento de cálculo semelhante aquele empregado para a determinação da PAA, acrescentando-se apenas o uso do fator 0,5665, necessário para converter ATR em álcool anidro, conforme apresentado na Equação 23.

$$PAE1G = \frac{AT_{\text{parcela}} \cdot 0,5665}{VT_{\text{irrigação}}} \quad (23)$$

Em que:

PAE1G - produtividade da água para etanol de 1ª geração, em L m^{-3} ; e

0,5665 - constante para conversão de 1kg de ATR em 0,5665 litro de etanol anidro.

3.8.9 Biomassa seca da parte aérea das plantas

A biomassa seca total da parte aérea das plantas foi obtida somando-se a matéria seca de todas as partes amostradas da planta durante as colheitas. Sendo assim, após a secagem do material em estufa de circulação forçada de ar, somou-se a matéria seca dos perfilhos improdutivos, limbos foliar, bainhas, despontes, e colmos de cada parcela. Ressalta-se que, para obtenção da matéria seca dos colmos, o valor foi estimado adotando-se os valores de umidade calculados no item 3.8.4. Assim, a matéria seca dos colmos representa a somatória de fibras e sólidos solúveis, descontando-se apenas a água. As demais partes tiveram todo seu material seco determinado em estufa, sendo o peso medido em balança analítica digital.

3.8.10 Produtividade da Água para Biomassa

Para calcular a produtividade da água para biomassa, foi necessário converter os dados de BIOM de gramas para quilogramas, simplesmente dividindo os valores originais por 1000. De posse dos dados de BIOM convertidos, a PAB foi calculada pela Equação 24.

$$PAB = \frac{BIOM}{VT_{irrigação}} \quad (24)$$

Em que:

PAB - produtividade da água para biomassa; em kg m⁻³;

BIOM - biomassa seca da parte aérea das plantas; em kg; e

VT_{irrigação} - volume total de água aplicado na parcela, em m⁻³.

3.8.11 Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração na Cana-de-Açúcar

Para determinação da produtividade da água (eficiência no uso da água) para etanol de 2ª geração, procedeu-se com o cálculo da conversão da biomassa seca da parte aérea em etanol, a partir dos teores de celulose e hemicelulose determinados em amostras de plantas analisadas.

Segundo Binod (2010), a celulose usualmente contém somente glicanos, enquanto a hemicelulose é formada por vários polímeros como manano, xilano, glicano, galactano e arabinano. Com isso, o produto da hidrólise da celulose será basicamente a glicose, ao passo que a hidrólise da hemicelulose produzirá vários tipos de pentoses e hexoses, sendo o xilano o polímero predominante (GÍRIO, 2010).

A conversão de celulose e hemicelulose pode ser expressa pela reação de glicano (para hexoses) e xilano (para pentoses) com água (CHOVAU, 2013) conforme apresentado nas Equações 25 e 26.

As conversões de celulose em glicose e hemicelulose em xilose foram calculadas assumindo que o rendimento máximo teórico de glicose é de 1,11 vezes maior do que o peso da celulose e o da xilose igual a 1,14 vezes maior que o peso da hemicelulose (1,11 g de glicose por grama de celulose e 1,14 g de xilose por grama de hemicelulose), devido à adição de água durante a hidrólise (CHOVAU, 2013; PECIULYTE, 2015). Após a estimativa da quantidade de açúcares fermentescíveis, o passo seguinte foi o da conversão destes em etanol. Para tanto, considerou-se o rendimento máximo teórico de 0,511 g de etanol e 0,489 g de CO₂ para cada grama de açúcar, conforme reação apresentada nas Equações 27 e 28.

Dessa forma, após realizada todas as conversões, chegou-se ao rendimento teórico máximo global de etanol (massa específica do etanol a 20°C igual a 0,789 g cm⁻³) de 0,719 e 0,736 L por kg de glicose e xilose, respectivamente.

A Figura 23 apresenta o esquema dos rendimentos obtidos em cada processo de conversão, partindo da biomassa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, até o rendimento potencial de etanol celulósico.

Figura 23 – Esquema do rendimento máximo teórico da produção de etanol celulósico. Rendimento obtido a partir de valores médios de celulose em cultivares de cana-de-açúcar (A) e Rendimento obtido a partir de valores médios de hemicelulose em cultivares de cana-de-açúcar (B). Adaptado de SANTOS et al. (2012)

Para determinação do indicador de produtividade da água na cultura da cana-de-açúcar para o etanol de 2ª geração, fez-se necessário a criação de dois parâmetros interdependentes, sendo eles a PAE2G_{CELULOSE} e a PAE2G_{HEMICELULOSE}. O primeiro envolve apenas o etanol proveniente da fermentação da celulose e o segundo é o produto da fermentação da hemicelulose. Esta distinção é importante porque a tecnologia atualmente disponível apresenta baixa produtividade para etanol a partir das pentoses, tendo se mostrado uma barreira tecnológica difícil de superar (RUNQUIST, 2010; GÍRIO, 2010).

O cálculo da produtividade da água para etanol de 2ª geração foi realizado a partir das equações 31 e 32, para as frações de celulose e hemicelulose, respectivamente. No entanto, anteriormente, foi necessária a conversão da biomassa em etanol celulósico a partir das equações 29 e 30, todas apresentada abaixo:

$$E2G_{\text{celulose}} = \frac{(\text{BIOM} \cdot f_{\text{celulose}}) \cdot 1,11 \cdot 0,511}{0,789} \quad \text{Equação 29}$$

$$E2G_{\text{hemicelulose}} = \frac{(\text{BIOM} \cdot f_{\text{hemicelulose}}) \cdot 1,14 \cdot 0,511}{0,789} \quad \text{Equação 30}$$

$$\text{PAE2G}_{\text{CELULOSE}} = \frac{E2G_{\text{celulose}}}{\text{VT}_{\text{irrigação}}} \quad \text{Equação 31}$$

$$\text{PAE2G}_{\text{HEMICELULOSE}} = \frac{E2G_{\text{hemicelulose}}}{\text{VT}_{\text{irrigação}}} \quad \text{Equação 32}$$

Em que:

$E2G_{\text{celulose}}$ - Rendimento de etanol de 2ª geração a partir dos açúcares da celulose;

$E2G_{\text{hemicelulose}}$ - Rendimento de etanol de 2ª geração a partir dos açúcares da hemicelulose;

f_{celulose} - Fração de celulose presente na biomassa seca;

$f_{\text{hemicelulose}}$ - Fração de hemicelulose presente na biomassa seca;

1,11 - Fator de rendimento teórico para a conversão enzimática da celulose em glicose;

1,14 - Fator de rendimento teórico para a conversão enzimática da hemicelulose em xilose;

0,511 - Fator de rendimento teórico para o processo de fermentação alcoólica;

0,789 - massa específica do etanol a 20 °C, em g cm⁻³;

$\text{PAE2G}_{\text{celulose}}$ - produtividade da água para etanol de 2ª geração, em L m⁻³; e

$\text{PAE2G}_{\text{hemicelulose}}$ - produtividade da água para etanol de 2ª geração potencial, em L m⁻³.

Para a determinação do rendimento de etanol a partir da biomassa a nível de parcela, foram ainda consideradas perdas de 1% para a degradação da palha no campo antes da coleta da mesma e 3% referentes a perdas no processo de colheita dos colmos (NEVES et al., 2004). Foi ainda desconsiderada, para efeito de conversão em etanol celulósico, uma fração da palha correspondente a 5 t ha⁻¹ deixadas no campo, que seria a fração correspondente a manutenção da biota do solo, liberação de matéria orgânica, retenção hídrica, controle de ervas daninhas, dentre outros (FRANCO et al., 2011).

3.9 Determinação dos componentes lignocelulósico

A determinação dos componentes lignocelulósicos (holocelulose e lignina) foi realizada na variedade V4, tendo a escolha sido feita a partir do critério de material mais produtivo durante o ciclo da cana-planta, no que diz respeito ao rendimento de colmos. Para esta variedade, realizou-se a quantificação da celulose, hemicelulose e lignina dos componentes estruturais formadores da planta, sendo eles: folhas, bainhas, desponte e colmo, tendo este último sido analisado ao nível de bagaço.

As análises foram realizadas em amostras de plantas conduzidas sob o regime hídrico das lâminas de 100 e 50% da DHP, coletadas ao final do primeiro ciclo de cultivo (cana-planta). Para caracterização química dos componentes lignocelulósicos, amostras das frações da planta previamente desidratadas foram encaminhadas para o Laboratório de Açúcar e Álcool da ESALQ, onde as análises foram realizadas.

Os procedimentos para condução das análises envolveram moagem das frações da planta até partículas menores que 1,0 mm, que foram posteriormente passadas por peneira de 25 *mesh*. Para extração dos componentes extrativos (terpenóides, terpenos, gorduras, ceras e outros compostos responsáveis por cor, cheiro, propriedades abrasivas e outras), utilizou-se etanol a 95% como solvente polar em equipamento *Soxhlet*, em uma porção de cinco gramas de material moído, que foram acondicionados em envelopes de papel filtro (FERRAZ et al., 2000).

Após a retirada dos componentes extrativos, procedeu-se a etapa de hidrólise ácida em 0,3 gramas da biomassa resultante do estágio anterior. Esta sub-amostra foi acondicionada em tubo de ensaio, e em seguida adicionou-se 3 mL de H₂SO₄ (72% v/v) e 79 mL de água. Posteriormente, a mistura foi colocada em banho-maria por uma hora, a 30 °C com agitação de 75 rpm. Após esta etapa, a sub-amostra foi conduzida para autoclave e foi submetida a uma pressão de 1 atm e temperatura de 121°C, pelo intervalo de uma hora (FERRAZ et al., 2000).

De posse do material hidrolisado, procedeu-se com a determinação da lignina, celulose e hemicelulose, a partir de técnicas de gravimetria, espectrofotometria e cromatografia líquida de alta performance, respectivamente.

Na Figura 24 estão representadas as frações de celulose, hemicelulose e lignina determinadas em frações das componentes folhas, bainhas, desponte e colmo (bagaço), para as duas condições de disponibilidade hídrica avaliadas.

Figura 24 – Frações de celulose, hemicelulose e lignina em componentes da planta de cana-de-açúcar (valores médios da variedade V4)

3.10 Índice de Colheita

O índice de colheita (IC) é um quociente frequentemente utilizado para medir a eficiência de conversão de produtos sintetizados em material de importância econômica (MARAFON, 2012). Foi calculado o índice com base na biomassa da parte aérea, sendo a razão entre a massa total de açúcar produzido na parcela (fração economicamente rentável) e a biomassa seca da parte aérea (Equação 33).

$$IC_{AÇÚCAR} = \frac{AT_{parcela}}{BIOM} \quad (33)$$

Em que:

$AT_{parcela}$ - total de açúcar produzido na parcela, em kg; e

$BIOM$ - biomassa seca da parte aérea das plantas; em kg.

3.11 Índice de Maturação

O índice de maturação foi medido no colmo do perfilho principal. Imediatamente após a colheita, todos os colmos foram identificados e encaminhados para o laboratório e individualmente tiveram seu caldo extraído em duas porções do colmo (Figura 25): base e ápice. Como o tamanho dos colmos e o número de entrenós apresentaram-se variáveis, optou-se por extrair o caldo do segundo entrenó acima do corte do colmo (representando a base), e do penúltimo entrenó anterior ao ponto de desponte do colmo (representando o ápice).

Figura 25 – Extração do caldo para determinação do Índice de Maturação (IM)

O caldo extraído foi analisado no refratômetro digital de bancada (Rudolph J47®) e com o valor de Brix medido, foi calculado o índice de maturação pela Equação 34.

$$IM = \frac{Brix_{\text{ápice}}}{Brix_{\text{base}}} \quad (34)$$

Em que:

IM - índice de maturação;

Brix_{base} - brix representativo da base do colmo, em °Brix; e

Brix_{ápice} - brix representativo da ponta do colmo, em °Brix.

As médias do IM foram interpretadas de acordo com os estádios de maturação da cana-de-açúcar. Estes estádios são definidos a partir dos valores limites do IM apresentados na Tabela 11 (DEUBER, 1988).

Tabela 11 – Índice de maturação da cana-de-açúcar baseado na relação dos valores de Brix do ápice e da base do colmo (DEUBER, 1988)

Índice de Maturação	Estádio de maturação
< 0,60	Cana-de-açúcar verde
0,60 – 0,85	Em maturação
0,85 – 1,00	Madura
> 1,00	Em declínio de maturação

3.12 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente de cultura (K_c)

Para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) utilizou-se a equação de Priestley-Taylor (Equação 35), a qual necessita de dados de saldo de radiação para o seu cálculo. No entanto, como o saldo radiômetro só foi instalado no final do ciclo da cana-planta, foi necessário o estabelecimento de relações entre o saldo de radiação e a radiação global ocorrida durante o ciclo da cana soca, para que fosse possível a determinação da ET_o para todo período experimental a partir desta equação. O modelo de regressão obtido é apresentado na Figura 26.

$$ET_o = \frac{1,26 W (R_n - G)}{2,45} \quad (35)$$

Em que:

ET_o - evapotranspiração de referência, em mm dia⁻¹;

R_n - saldo de radiação na superfície, em MJ m⁻² dia⁻¹;

G - fluxo de calor no solo, em MJ m⁻² dia⁻¹;

2,45 - constante que converte a estimativa para mm; e

W - fator de ponderação dependente da temperatura e do coeficiente psicrométrico.

Para o cálculo de W são utilizadas as Equações 36 e 37 apresentadas abaixo:

$$W = 0,407 + 0,0145 T \quad (0^\circ\text{C} < T < 16^\circ\text{C}) \quad (36)$$

$$W = 0,483 + 0,01 T \quad (16,1^\circ\text{C} < T < 32^\circ\text{C}) \quad (37)$$

É importante mencionar que o método normalmente adotado para a estimativa da ET_o é o de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), que inclusive é considerado como padrão pela FAO. Contudo, como no interior da estufa não foi medida a velocidade do vento, que é uma das variáveis que compõe o método, fez-se necessário à adoção de outra metodologia.

Figura 26 – Regressão entre radiação solar global e saldo de radiação no interior da estufa. Dados do 2º ciclo de cultivo (cana-soca)

Após realizada as estimativas de ETo para o interior da estufa, procedeu-se com a comparação destes dados com os de ETo obtidos externamente; para isso, utilizou-se os dados obtidos no Posto Meteorológico da Esalq, com os quais foram determinadas as estimativas de ETo diárias com a equação de Penman-Monteith.

Na comparação das estimativas de ETo obtidas no interior e exterior da estufa (Figura 27), observou-se que a demanda evapotranspirométrica interna representou 78% da demanda externa, o que corrobora com as observações realizadas por Farias et al. (1994) e com a fração da ETo externa assumida por Barbosa (2015), neste mesmo experimento, em estudos com o ciclo da cana-planta.

Figura 27 – Regressão entre as estimativas de ETo a partir da equação de Penman-Monteith FAO-56 (dados externos – Posto Meteorológico) e Priestley-Taylor (dados do interior da estufa).

Para a estimativa do coeficiente de cultura (K_c) foi inicialmente determinada a lâmina total de irrigação aplicada para cada parcela ao longo de todo o experimento, para isto utilizou-se a Equação 38.

$$LT = \frac{VT_{\text{irrigação}}}{AT_{\text{estufa}} / N_{\text{parcela}}} \cdot 1000 \quad (38)$$

Em que:

LT - lâmina total de irrigação aplicada na parcela, em mm;

$VT_{\text{irrigação}}$ - volume total de água aplicado na parcela, em m^3 ;

AT_{estufa} - área total da estufa, $400,0 m^2$; e

N_{parcela} - número total de parcelas, 396 parcelas.

Com o valor de lâmina total de irrigação aplicada foi calculada a lâmina real de irrigação disponibilizada em cada parcela, para isto, adotou-se a eficiência de aplicação do sistema de 90,0 % (Equação 39).

$$LR = LT \cdot E_a \quad (39)$$

Em que:

LR - lâmina real de irrigação disponibilizada na parcela, em mm;

LT - lâmina total de irrigação aplicada na parcela, em mm; e

E_a - eficiência de aplicação do sistema, em decimal.

Após o cálculo da lâmina real de irrigação disponibilizada em cada parcela, os coeficientes de cultura foram calculados individualmente para cada parcela com a Equação 40.

$$K_c = \frac{LR}{ET_{oAc}} \quad (40)$$

Em que:

K_c - coeficiente de cultura, adimensional;

LR - lâmina real de irrigação disponibilizada na parcela, em mm; e

ET_{oAc} - evapotranspiração de referência acumulada, em mm.

3.13 Análise dos resultados

As variáveis mensuradas apenas no segundo ciclo de cultivo (cana-soca), tais como as variáveis referentes a área foliar e da dinâmica de particionamento da biomassa, foram analisadas no esquema de parcelas subdivididas, tendo em vista que para estas foram estudadas apenas duas fontes de variação: Lâmina e Variedades. Para as demais variáveis,

utilizou-se o esquema de parcelas sub-subdivididas, uma vez que houve a inclusão do fator Ciclo.

Previamente a realização da análise de variância, os dados experimentais foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk (SHAPIRO-WILK, 1965) e de Levene (BOX, 1953); ambos a 5% de probabilidade, para verificação básica da normalidade e homocedasticidade residuais, respectivamente, seguindo de transformações caso fossem necessárias. Para as transformações, optou-se por utilizar a família de transformações Box-Cox (BOX; COX, 1964), por ser um método simples e que apresenta bons resultados. Quanto às demais pressuposições, sendo elas a de independência dos resíduos e aditividade dos efeitos do modelo; estas foram garantidas pelos princípios básicos da experimentação (repetição, casualização e controle local).

Após o tratamento de adequação dos dados a serem analisados, procedeu-se com a análise de variância, tendo as variáveis que apresentaram valores de F significativos, no mínimo a 5% de probabilidade, suas médias submetidas ao teste de Scott-Knott, para estimativa da diferença mínima significativa e comparação das médias, também a um nível de 5% de probabilidade.

Quanto aos softwares utilizados para as análises, adotou-se o software livre SISVAR, versão 5.3 (FERREIRA, 2011), para realização das análises de variância; e o software livre Action (ESTATCAMP®, 2014) para as análises de normalidade e homocedasticidade, bem como para as transformações dos dados, quando estas foram necessárias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis meteorológicas e evapotranspiração de referência

O período de condução dos experimentos durou 756 dias, o qual foi compreendido entre os dias 31/01/2013 e 26/02/2015, sendo 380 dias para o ciclo da cana-planta e 376 dias para o ciclo da cana-soca. Neste intervalo, a temperatura média do ar no interior da estufa foi similar à temperatura externa, apresentando valores de 23,1 e 23,3°C, respectivamente. Segundo Rodrigues (1995), a faixa ideal de temperatura para o desenvolvimento da cana-de-açúcar situa-se entre 25 e 35°C.

Quanto aos extremos de temperatura ocorridos durante o período experimental, os valores foram de 6°C para temperatura mínima e 44°C para temperatura máxima, ambos verificados durante o ciclo da cana-planta, conforme apresentado na Figura 28.

De modo geral, pode-se admitir que a cana-de-açúcar apresenta queda expressiva no crescimento sempre que a temperatura do ar cair abaixo de 20°C e, contrariamente, taxas máximas quando submetida a temperaturas entre 30 e 34°C, passando a ocorrer estresse térmico sob condições de temperatura acima dos 35°C (BARBIERI; VILA NOVA, 1977; DOOREMBOS; KASSAN, 1979). No tocante aos eventos de temperatura máximas identificadas no interior da estufa, estes valores ocorreram de maneira pontual em períodos específicos do dia, e não interferiram significativamente no desenvolvimento da cultura.

Figura 28 – Temperatura máxima, mínima e média do ar no interior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar

Para a umidade relativa do ar, o valor médio verificado no interior da estufa foi de 73,1%, valor esse 16% menor do que a média de umidade relativa observada no exterior da estufa, que foi de 86,7%. De acordo com Castillo e Dentis (2001), as diferenças de umidade relativa do ar verificadas no interior e exterior de estufas, podem ser explicadas pelas diferentes condições de temperatura que ocorrem no ambiente protegido, e também está associada à falta ou deficiência de mistura do ar por conta da menor ventilação.

A Figura 29 apresenta o comportamento da umidade relativa do ar média, bem como dos valores máximos e mínimos verificados para esta variável ao longo de todo período experimental.

Figura 29 – Umidade relativa máxima, mínima e média do ar no interior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar

Para a radiação solar global (R_g), o valor médio registrado durante a condução do experimento foi de $12 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com extremos de 0,6 e $24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para radiação mínima e máxima, respectivamente (Figura 30). Na comparação entre os dados internos e externos, verificou-se que ocorreram atenuações médias provocada pela cobertura plástica da ordem de 44%; desta forma, apenas 56% da R_g incidente sobre a estufa conseguiu alcançar o dossel das plantas.

De modo geral, o valor médio de atenuação verificado neste estudo foi elevado, sendo comum medidas da ordem de 20 a 35% (FOLEGATTI et al., 1997; FRISINA et al., 1999; BECKMANN et al., 2006). As reduções são devido à reflexão e absorção pelo material da cobertura e ainda, eventuais sujeiras (poeira) depositada sobre a mesma.

Figura 30 – Radiação solar global diária no interior da estufa e a céu aberto durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar

Apesar do valor médio de atenuação da Rg no interior da estufa ter sido elevado, houve duas fases de controle da transmissividade da cobertura plástica ao longo do experimento, ambas promovidas por cuidados dispensados na limpeza (lavagem) do plástico, bem como com a troca do mesmo (Figura 31).

Figura 31 – Manutenções realizadas no plástico de cobertura da estufa. Limpeza (A) e troca do plástico (B)

Esse controle foi mais efetivo durante o ciclo da cana-soca e refletiu em valores médios de transmissividade de 65%, o qual foi significativamente maior do que os 49% verificados no primeiro ciclo de cultivo (cana-planta), conforme é apresentado na Figura 32. Nessa, é possível notar o efeito positivo do controle da radiação no interior da estufa a partir da troca do plástico da cobertura realizado durante o mês de julho de 2013, o qual permitiu aumento de 100% nos valores de transmissividade.

De acordo com Buriol et al. (1995), além da sujeira depositada sobre o material de cobertura de estufas plásticas e do tempo de exposição deste às condições ambientais, o

ângulo de incidência dos raios solares também atua na redução da transmissividade do plástico. Para Dal Pai (2010), a diferença na transmissividade sazonal é função da declinação solar; quando esta é negativa (sol declinando no hemisfério sul) nas estações de verão e primavera, têm-se os menores ângulos de incidências (menores reflexões) e maiores transmissões no polietileno, e quando a declinação é positiva (sol declinando no hemisfério norte) nas estações de inverno e outono, têm-se os maiores ângulos de incidências (maiores reflexões) e menores transmissões.

Figura 32 – Relação entre os dados de radiação solar global do interior e exterior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar

Os valores de evapotranspiração de referência (E_{To}) determinados no interior da estufa estão apresentados na Figura 33, bem como os dados de E_{To} calculados para o ambiente externo. Os métodos utilizados para determiná-los foram os de Priestley-Taylor e Penman-Monteith (FAO/56), para o ambiente interno e externo, respectivamente.

Figura 33 – Estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}) diária calculada para o interior e exterior da estufa durante os dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar

De modo geral, a evapotranspiração ocorrida no interior da estufa foi em média, 78% dos valores verificados externamente. Essa redução é plausível e ocorre em função da difusidade da cobertura plástica, a qual muda o balanço de radiação no interior da estufa, e também das condições de temperatura, umidade do ar e da redução da ação dos ventos, que são os principais fatores da demanda evaporativa da atmosfera (FERNANDES et al, 2003; GUISELINI et al., 2010). Valores semelhantes de ETo em ambiente protegido foram verificados por Farias et al. (1994) e Mpusia (2006).

O valor médio de ETo para todo período experimental foi de 3,18 mm dia⁻¹, com extremos de 6,62 e 0,19 mm dia⁻¹, para ETo máxima e mínima, respectivamente. A evapotranspiração acumulada foi de 1152,8 mm dia⁻¹ para o ciclo da cana-planta e 1174,1 mm dia⁻¹ para o ciclo da cana-soca. É importante mencionar que apenas um quarto do segundo experimento foi conduzido até o final do ciclo, tendo os outros 75% sido colhidos a cada 90 dias, conforme detalhado no item Delineamento Experimental.

4.2 Manejo nutricional das plantas

Conforme mencionado no item (manejo fitossanitário e nutricional), as adubações realizadas na cana-de-açúcar ocorreram mensalmente nos dois ciclos de cultivo, com o intuito de manter os níveis dos nutrientes no solo em condições ótimas de disponibilidade.

De forma a acompanhar/verificar o status nutricional das plantas, procedeu-se com análises químicas do solo e das folhas aos 130 DAP (5º mês de condução do experimento), apenas do solo aos 410 DAP (início do ciclo da cana-soca) e foliar aos 580 DAP.

Especificamente para o ciclo da cana-planta, a sondagem da fertilidade do solo ocorreu a partir de análises realizadas em amostras coletadas nas variedades 1, 3, 4 e 8, e que estavam submetidas ao tratamento de irrigação com lâminas de 100%; a escolha das variedades foi realizada de forma arbitrária. Para as análises foliares, a amostragem se deu em todas as variedades.

Os resultados obtidos naquela ocasião estão apresentados nas Tabelas 12 e 13, para análise do solo e foliar, respectivamente.

Tabela 12 – Resultado da análise química do solo para macro e micronutrientes aos 130 DAP (junho de 2013), para parcelas submetidas ao tratamento L100 das variedades V1, V3, V4 e V8

MACRONUTRIENTES													
Variedade	pH	M.O.	P _{resina}	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	CTC	V	m	S
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							-----%-----	mg dm ⁻³	
V1	5,3 c	14,0	18,0 d	1,0 b	22,0 d	8,0 d	22,0	0,0	31,0	53,0	58,0 c	0,0	15,0 d
V3	5,5 c	14,0	20,0 d	1,0 b	21,0 d	7,0 d	20,0	0,0	29,0	49,0	59,0 c	0,0	21,0 d
V4	5,6 c	9,0	20,0 d	0,8 b	20,0 d	7,0 d	18,0	0,0	28,0	46,0	61,0 c	0,0	15,0 d
V8	5,6 c	14,0	17,0 d	1,0 b	21,0 d	7,0 d	18,0	0,0	29,0	47,0	62,0 c	0,0	21,0 d
MICRONUTRIENTES													
Variedade	Cu		Fe		Zn		Mn		B				
	----- DTPA ----- (água quente)												
	----- mg dm ⁻³ -----												
V1	0,5 c		26,0 d		1,2 d		5,8 d		0,44 c				
V3	0,6 c		30,0 d		1,7 d		7,6 d		0,29 c				
V4	0,5 c		26,0 d		1,7 d		4,8 c		0,31 c				
V8	0,6 c		29,0 d		1,9 d		5,5 d		0,33 c				

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P-resina); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio + alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S) na forma de sulfato (S-SO₄); Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos. IAC (2014) e Raij et al. (1997)

Tabela 13 – Resultado da análise foliar para macro e micronutrientes realizada aos 130 DAP (junho de 2013) nas parcelas do tratamento L100 para todas as variedades

Variedade	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----					
V1	21,0	1,8	20,5	6,6	2,4	4,6	6,0	240,0	14,0	106,0	23,0
V2	21,0	1,9	19,8	7,6	2,0	4,3	6,0	232,0	16,0	118,0	25,0
V3	20,3	1,5	16,4	8,0	2,4	4,9	6,0	204,0	17,0	108,0	22,0
V4	21,0	1,6	15,0	5,2	1,6	4,0	6,0	192,0	15,0	68,0	25,0
V5	19,6	1,7	16,4	7,6	1,9	4,1	6,0	200,0	17,0	130,0	17,0
V6	20,3	1,7	17,7	7,8	2,1	5,1	6,0	224,0	17,0	128,0	19,0
V7	21,0	2,1	17,7	8,5	2,5	4,6	6,0	216,0	20,0	116,0	21,0
V8	23,8	2,3	17,7	6,6	2,7	3,3	6,0	256,0	21,0	152,0	26,0

Nitrogênio (N); fósforo (P); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); enxofre (S); cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B).

Na comparação com os níveis iniciais de nutrientes no solo verificados na implantação do experimento (Tabelas 6 e 7), verificou-se que houve redução nos níveis de fósforo, potássio e magnésio aos 130 DAP, no entanto, essa redução foi proporcional entre as variedades avaliadas, e não sofreu influência da demanda hídrica diferenciada entre as mesmas, tendo o mesmo comportamento sido observado também nos níveis dos micronutrientes.

Quanto às análises realizadas no tecido vegetal (folhas), os resultados evidenciaram níveis adequados dos nutrientes nas oito variedades avaliadas, tanto para macro como micronutrientes (RAIJ et al., 1997).

Para o ciclo da cana-soca, a análise de solo foi realizada logo após a colheita do ciclo anterior, objetivando-se assim, efetuar as correções necessárias na fertilidade do solo, de modo que as plantas pudessem se desenvolver sem restrição nutricional. Os resultados apresentados na Tabela 14 demonstram níveis satisfatórios para quase todos os nutrientes, com exceção do potássio, que exibiu baixos níveis para todas as variedades estudadas, com média de $0,5 \text{ mmolc dm}^{-3}$, sendo classificado como muito baixo, de acordo com a categorização adotada por Raj et al., (1997).

Ainda em relação aos baixos teores de potássio, seus valores são justificados pela maior extração desse nutriente em relação aos demais, com resultados de literatura apresentando valores que variam entre $1,11$ a $1,89 \text{ kg t}^{-1}$ de colmo colhido (GOLDEN, 1961; RAJ et al., (1997).

Tabela 14 – Resultado da análise química do solo para macro e micronutrientes aos 410 DAP (março de 2014), para parcelas submetidas ao tratamento L100 das variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8

MACRONUTRIENTES														
Variedade	pH	M.O.	P _{resina}	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S.B.	CTC	V	m	S	
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----							-----%-----	mg dm ⁻³		
V1	5,5 c	19,4	22,3 b	0,5 a	23,0 d	4,9 c	19,6	0,0	28,7	48,2	59,1 c	0,0	32,0 d	
V2	5,5 c	16,8	18,9 b	0,3 a	22,2 d	6,3 c	19,8	0,0	28,6	48,3	59,2 c	0,0	31,4 d	
V3	5,6 c	17,6	22,2 b	0,4 a	23,6 d	6,7 c	19,6	0,0	30,7	50,2	60,9 c	0,0	41,8 d	
V4	5,7 b	17,7	19,2 b	0,4 a	24,3 d	8,0 c	18,2	0,0	32,9	51,1	64,0 c	0,0	43,0 d	
V5	5,4 c	17,4	20,0 b	0,4 a	21,4 d	7,6 c	21,9	0,0	29,3	51,2	57,3 c	0,0	43,7 d	
V6	5,5 c	20,2	26,8 c	0,6 a	24,0 d	7,2 c	21,4	0,0	32,0	53,4	60,2 c	0,0	34,9 d	
V7	5,6 c	21,0	23,1 b	0,8 b	26,0 d	8,2 d	19,8	0,0	35,3	55,1	63,4 c	0,0	42,8 d	
V8	5,5 c	19,3	23,8 b	0,4 a	22,2 d	6,6 c	20,0	0,3	29,3	49,3	59,4 c	1,0	42,9 d	
MICRONUTRIENTES														
Variedade	Cu		Fe		Zn		Mn		B					
	----- DTPA -----													(água quente)
	----- mg dm ⁻³ -----													
V1	0,6 c		26,1 d		2,0 d		2,9 c		0,4 c					
V2	0,6 c		37,8 d		1,7 d		3,1 c		0,5 c					
V3	0,6 c		27,6 d		2,1 d		3,6 c		0,4 c					
V4	0,5 c		27,1 d		1,7 d		3,0 c		0,5 c					
V5	0,6 c		36,4 d		2,0 d		3,8 c		0,5 c					
V6	0,6 c		27,8 d		3,9 d		3,9 c		0,5 c					
V7	0,6 c		26,8 d		2,4 d		3,8 c		0,4 c					
V8	0,6 c		32,7 d		2,0 d		3,5 c		0,4 c					

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P-resina); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio + alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S) na forma de sulfato (S-SO₄); Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos. IAC (2014) e Raij et al. (1997)

No tocante aos teores de micronutrientes, estes apresentaram-se dentro de limites médios a altos (RAJ et al., 1997), com pouca variação entre as variedades.

A partir do resultado da análise foliar realizado aos 580 DAP (Tabela 15), observaram-se reduções em sete dos 11 nutrientes analisados, sendo eles: N, P, K, Ca, B, Cu e Mn. Diante desta constatação, procedeu-se com substituições parciais dos fertilizantes utilizados até aquele momento, por outros com teores mais elevados dos nutrientes que encontravam-se em níveis não adequados. A relação dos fertilizantes aplicados apenas no ciclo da cana-soca pode ser observada na Tabela 10.

Tabela 15 – Resultado da análise foliar para macro e micronutrientes realizada aos 580 DAP (setembro de 2014) nas parcelas do tratamento L100 para todas as variedades

Variedade	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹					
V1	13,3	1,7	8,4	6,1	3,5	4,9	6,0	264,0	78,0	42,0	16,0
V2	14,7	1,6	9,7	5,0	2,1	2,6	6,0	168,0	57,0	46,0	11,0
V3	15,4	1,4	6,4	5,0	2,8	5,1	4,0	184,0	59,0	50,0	12,0
V4	15,4	1,4	8,4	4,2	1,4	3,9	6,0	160,0	62,0	16,0	16,0
V5	14,0	1,4	9,7	5,9	2,3	2,7	6,0	160,0	67,0	28,0	12,0
V6	14,0	1,5	8,4	5,9	1,7	3,3	6,0	152,0	58,0	36,0	18,0
V7	14,7	1,6	7,1	5,2	2,3	4,1	6,0	184,0	62,0	22,0	13,0
V8	15,4	1,5	6,4	4,4	2,8	3,1	6,0	204,0	69,0	34,0	14,0

Nitrogênio (N); fósforo (P); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); enxofre (S); cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B).

Adicionalmente aos métodos de análise de tecido vegetal e de solo, realizou-se também o acompanhamento do status nutricional por meio de análises de solução do solo. Esta modalidade de monitoramento da fertilidade foi realizada por amostragem nas variedades V1, V4 e V8 no ciclo da cana-planta e V3, V4 e V7 no ciclo da cana-soca, ambas nos tratamentos submetidos a lâminas de 100%.

A Tabela 16 apresenta o resultado da análise da solução do solo durante o ciclo da cana-planta. Nessa, os valores de condutividade elétrica (CE), permaneceram abaixo de 1,7 dS m⁻¹, que é considerado por Tanji e Kielen (2002), como o limiar de CE para que ocorra decréscimo na produção da cana-de-açúcar. Quanto ao nitrato, que apresentou valores destoantes entre as duas avaliações, provavelmente os maiores valores evidenciados na primeira leitura ocorreram em função do maior aporte de nitrogênio na fase inicial de cultivo da cana-planta, estágio esse onde o crescimento vegetativo ocorre de forma mais intensa.

No tocante ao potássio, os valores médios observados nas duas avaliações (50,4 e 19,5 mg L⁻¹) ficaram dentro de níveis adequados, tendo em vista que segundo Blanco (2006), a concentração desse nutriente variando entre 20 a 60 mg L⁻¹ é referência para a maioria das

culturas conhecidas. Para as demais variáveis analisadas (pH e Na), os valores observados nas duas avaliações permaneceram dentro de limites aceitáveis e, portanto, não interferiram no desenvolvimento das plantas.

Tabela 16 – Resultado da análise química da solução do solo extraída em três profundidades de parcelas submetidas ao tratamento de irrigação L100 para as variedades V1, V4 e V8 nos meses de maio e julho de 2013 (cana-planta)

Variedade	Prof m	Maio de 2013					Julho de 2013				
		Ce	pH	NO ₃	K	Na	Ce	pH	NO ₃	K	Na
		dS m ⁻¹		mg L ⁻¹			dS m ⁻¹		mg L ⁻¹		
V1	0,10	1,15	7,1	378,8	33,1	88,3	0,44	6,5	95,1	13,3	41,6
	0,30	1,06	7,2	577,2	33,6	37,9	0,56	6,7	237,7	15,3	23,4
	0,50	1,52	7,3	1406,9	36,0	35,5	0,53	6,8	209,2	20,7	13,0
V4	0,10	0,83	7,2	469,0	36,4	48,1	0,46	6,9	171,2	9,5	47,6
	0,30	1,31	7,1	928,9	51,4	33,7	0,35	6,9	76,1	9,8	32,5
	0,50	1,67	7,3	1578,3	56,7	42,8	1,03	6,7	646,6	10,8	21,4
V8	0,10	0,92	6,8	450,9	80,4	74,9	0,73	6,8	494,4	34,0	35,6
	0,30	1,73	7,0	1415,9	69,0	42,3	0,53	7,1	218,7	23,8	26,1
	0,50	1,61	7,1	1361,8	57,3	24,7	0,97	6,9	665,6	37,9	14,6

Condutividade elétrica (Ce); potencial hidrogeniônico (pH); nitrato (NO₃); potássio (K); sódio (Na)

Na análise da solução do solo realizada aos 650 DAP (Tabela 17), foi identificada elevada carência nutricional nas plantas avaliadas, promovida por problemas com a água de irrigação que abastecia o experimento. O referido problema foi provocado pela redução na vazão do rio Piracicaba, que abastece o campus “Luiz de Queiroz” da USP, o qual foi acometido por uma forte estiagem no ano de 2014. O menor volume de água no rio promoveu o aumento na concentração de poluentes e, como consequência, um gasto maior com produtos químicos para o seu tratamento. Dessa forma, o experimento passou a ter uma qualidade de água bastante aquém da que poderia ser utilizada para a irrigação. Essa condição fez com que valores de variáveis como CE e sódio, além de outros sais dissolvidos na mesma, passassem a atingir níveis restritivos para utilização na irrigação do cultivo da cana, como pode ser observado na Tabela 18.

Tabela 17 – Resultado da análise química da solução do solo extraída em três profundidades de parcelas submetidas ao tratamento de irrigação L100 para as variedades V13, V4 e V7 650 DAP (novembro de 2014)

Variedade	Prof.	Dezembro de 2014				
		Ce	pH	NO ₃	K	Na
	m	dS m ⁻¹			mg L ⁻¹	
V3	0,10	1,28	7,54	7,8	0,9	192,0
	0,30	1,48	7,58	10,7	1,0	258,0
	0,50	7,19	7,58	4,4	2,5	1843,0
V4	0,10	3,14	7,72	56,9	1,6	646,0
	0,30	1,25	7,27	46,7	2,0	220,0
	0,50	8,23	7,19	10,5	2,0	827,0
V7	0,10	1,69	7,14	11,3	0,7	348,0
	0,30	1,21	7,61	91,6	2,0	234,0
	0,50	6,12	6,67	4,4	0,7	1308,0

Condutividade elétrica (Ce); potencial hidrogeniônico (pH); nitrato (NO₃); potássio (K); sódio (Na)

Tabela 18 – Valores de condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Cloro (Cl), Sódio (Na), Carbonato (CO₃), Bicarbonato (HCO₃) e Razão de Adsorção de Sódio (RAS) encontrados na análise química da água utilizada para irrigação no campus “Luiz de Queiroz” da USP (dezembro de 2014).

Análise Química da Água de Irrigação	
Ce (ds/m)	0,85
pH	7,00
K mmol _c /dm ³	1,13
Ca mmol _c /dm ³	9,84
Mg mmol _c /dm ³	0,70
Cl mmol _c /dm ³	6,43
Na mmol _c /dm ³	13,05
CO ₃ mmol _c /dm ³	0,00
HCO ₃ mmol _c /dm ³	1,30
RAS _{aj} *	12,76

*RAS_{aj} – Razão de Adsorção de Sódio ajustada

Na análise da água de irrigação realizada em dezembro de 2014, esta foi classificada como C₃S₂ segundo metodologia de Richards (1954). Esta classificação indica que a água apresenta alto perigo de salinidade, podendo apenas ser utilizada na irrigação de culturas tolerantes quando se adotar práticas especiais de manejo da água e solo, sendo aconselhável a utilização de lâmina de lixiviação. No entanto, em experimentos onde são estudadas diferentes condições de disponibilidade hídrica no solo, como é o caso desta pesquisa, uma lâmina de lixiviação pode interferir nos resultados de variáveis de interesse, uma vez que o principal fator está sendo alterado. Mesmo diante deste risco, tornou-se necessária a aplicação de uma lâmina de lixiviação no experimento, em virtude dos elevados valores de CE e Na verificados na solução do solo (Tabela 17).

A lâmina de lixiviação aplicada foi de 55 mm e foi parcelada em duas irrigações de volumes iguais com intervalo de 12 horas entre elas. O objetivo do fracionamento foi o de permitir que os sais presentes nos microporos pudessem migrar por difusão química (diferença de concentração) no primeiro evento de irrigação e, dessa forma, serem facilmente lixiviados na parcela seguinte de aplicação.

Apesar de ter-se adotado o uso de uma lâmina de lixiviação, apenas com um evento de lâmina excessiva, não se conseguiu redução significativa nos valores de CE e Na; contudo, conforme já mencionado anteriormente, sua continuação poderia descaracterizar o experimento, uma vez que o fator lâmina de irrigação foi o principal elemento de interesse nessa pesquisa.

Em relação à tolerância da cana-de-açúcar à salinidade, de acordo com Santana (2007), a cultura é considerada moderadamente sensível, e a redução do rendimento pode chegar a 50% em solos com condutividade elétrica de $10,4 \text{ dS m}^{-1}$. Já Blackburn (1984), identificou uma tolerância modesta da cultura a valores menores de CE, e relatou que o crescimento e a produtividade da cana foram praticamente inalterados em CE de até $3,0 \text{ dS m}^{-1}$. Dessa forma, é possível que a alta frequência de irrigação utilizada nesta pesquisa, com irrigações a cada dois dias, possa ter minimizado o problema de salinidade nos tratamentos submetidos a lâminas de 100%. Contudo, nos outros três tratamentos em que lâminas restritivas foram impostas, é difícil mensurar se os decréscimos verificados no rendimento são atribuídos aos tratamentos hídrico-restritivo ou a ocorrência de salinidade, principalmente pelo fato desta última ter sido momentânea.

Associado ao problema de salinidade está o de sodificação do solo, tendo em vista que os valores deste elemento alcançaram o patamar de 1800 mg dm^{-3} , como pode ser observado na Tabela 18. Palaniswamy e Moshi (1973) citados por Guerzoni (2010) mostraram que uma proporção elevada de Na no complexo de troca do solo aumenta o conteúdo de Na nas plantas de cana-de-açúcar, as quais, em seu estudo, apresentaram decréscimo na produção.

De acordo com Dias e Blanco (2010), os sintomas típicos do sódio aparecem em forma de queimaduras ou necrose, ao longo das bordas e é resultado de alta proporção de sódio na água (alto teor de sódio ou RAS). Ainda de acordo com estes autores, a elevada concentração deste elemento nas folhas alcançam níveis tóxicos após vários dias ou semanas e os sintomas aparecem, de início, nas folhas mais velhas e em suas bordas e, à medida que o problema se intensifica, a necrose se espalha progressivamente na área internervural, até o centro das folhas.

Nas Figuras 34A e 34B são mostradas plantas do experimento que apresentaram folhas com bordas e ponteiro necrosados, características típicas de fitotoxidez por Na.

Figura 34 – Plantas de cana-de-açúcar com sintomas de fitotoxidez por sódio (A) e bordas e ponteiro das folhas necrosadas (B)

Na terceira semana de janeiro de 2015, novas análises foram realizadas para a água de irrigação, e nessas, os valores de Na já se apresentaram menores do que aqueles mostrados na Tabela 16, possivelmente, em virtude do aumento da vazão do rio Piracicaba e, consequente redução na concentração de poluentes, que por sua vez demandou uma quantidade menor de produtos químicos para adequação da potabilidade da água. O valor verificado nesta última análise registrou 70 mg dm^{-3} de Na, ou seja, apenas um quarto do que foi determinado um mês antes. A redução apesar de significativa, ainda não tornou a água de boa qualidade, mas, aliada a uma adubação potássica complementar, fez com que as plantas recuperassem o verde natural das folhas.

4.3 Demanda hídrica das variedades e estimativa do coeficiente de cultivo (Kc)

Em termos de demanda hídrica potencial, os volumes acumulados pelas oito variedades submetidas ao tratamento de irrigação de 100% da DHP, nos ciclos da cana-planta e soca, podem ser observados nas Figuras 35 e 36, respectivamente.

Para o primeiro ciclo de cultivo, verificou-se demanda média de 913,9 mm, com diferença entre as variedades de maior e menor consumo de 355 mm. Para o ciclo da cana-soca, a demanda média das variedades foi 12% maior do que a observada no ciclo da cana-planta, com valor de 1025,4 mm, e diferença entre as variedades de maior e menor consumo de 450,0 mm.

De acordo com Scardua e Rosenfeld (1987), a diferença de consumo entre ciclos é sabida, bem como entre estádios fenológicos; estas ocorrem em função de variações climáticas, disponibilidade de água no solo, entre outros fatores. Leal (2012), estudando a evapotranspiração de 24 variedades de cana-de-açúcar em três ciclos de cultivo, verificou que a demanda evapotranspirométrica da cana-planta foi, em média, 71 e 88% das observadas nas duas socas seguintes; comportamento similar foi observado neste estudo e, provavelmente, isso ocorre em função do maior desenvolvimento vegetativo inicial que se observa nos ciclos de cana-soca, na comparação com o da cana planta, que pode estar associado à dinâmica do sistema radicular e área foliar entre ciclos.

No tocante ao consumo entre variedades observado nos dois ciclos de cultivo, a ordem decrescente de consumo destas para o primeiro ciclo de cultivo foi: $V1 > V2 > V4 > V7 > V3 > V5 > V6 > V8$ e $V2 > V3 > V5 > V8 > V4 > V1 > V7 > V6$, para a cana-soca. Segundo Angelocci (2002), as variações no consumo hídrico podem ser atribuídas a possíveis diferenças entre as variedades, em características morfofisiológicas, tais como, rugosidade da superfície, arquitetura da planta, condutância e resistência hidráulica, dentre outras, influenciando assim, os processos de trocas gasosas/energéticas.

Figura 35 – Irrigação total acumulada (litros) por parcela no tratamento com lâmina de 100%, para as oito variedades estudadas durante o ciclo da cana-planta

De acordo com Doorembos e Kassam (1979) e Steduto et al. (2012), a demanda hídrica da cana-de-açúcar, em condições de campo, pode variar entre 800 a 2500 mm. Neste estudo, apenas a variedade V8, no primeiro ciclo de cultivo, apresentou demanda fora desta faixa de consumo. No entanto, deve-se considerar que o fato do experimento ter sido

conduzido em casa de vegetação, implica em uma menor demanda evapotranspirométrica das variedades, que pode ser atribuída a alterações de comportamento dos elementos meteorológicos em ambiente protegido, proporcionando reduções da ordem de 22% na ETo, como foi apresentado na Figura 33 (ET_{Oint/ext}).

Figura 36 – Irrigação total acumulada (litros) por parcela no tratamento com lâmina de 100%, para as oito variedades estudadas durante o ciclo da cana-soca

A Tabela 18 apresenta o consumo hídrico de todas as variedades submetidas às quatro diferentes condições de disponibilidade hídricas impostas. As variedades V1, V2 e V4, foram nessa sequência, as que apresentaram o maior consumo para o ciclo da cana-planta, já para o ciclo da cana-soca, os maiores consumos foram registrados pelas variedades V2, V3 e V5.

Quanto às variedades que apresentaram o menor consumo, o destaque foi para a V8 no primeiro ciclo e V6 no segundo ciclo de cultivo. É importante mencionar que a V8 foi, dentre as variedades estudadas, a única que não teve suas gemas preparadas durante a fase de mudas, pela equipe que conduziu a pesquisa. As gemas para esta variedade foram cedidas por um parceiro e, provavelmente, por não ter tido o mesmo cuidado dispensado para as gemas das demais variedades, este material propagativo tenha tido um comportamento inicial durante o ciclo da cana-planta tão díspare daquele observado no segundo ciclo de cultivo. Esse fato, provavelmente, explica o resultado de demanda hídrica contrastante entre os dois ciclos de cultivo.

Ainda na Tabela 19 é possível observar a pouca diferença entre as lâminas de 75% e 75%*, sendo esta última a que apresentou, ao longo do experimento, lâmina variável, mas com volume semelhante à lâmina de 75%. A diferença de volume média verificada nos dois ciclos foi de apenas 4%.

Tabela 19 – Volume total de água aplicada (litros) por parcela para todos os tratamentos nos dois ciclos de cultivo (cana-soca e cana-planta)

Variedade	L50		L75		L100		L75*	
	Cana Planta	Cana Soca	Cana Planta	Cana Soca	Cana Planta	Cana Soca	Cana Planta	Cana Soca
V1	569,9	536,8	816,7	756,8	1063,4	976,9	803,3	728,4
V2	566,5	676,1	809,0	968,2	1051,5	1260,3	804,5	900,2
V3	486,5	668,9	692,2	957,2	897,9	1245,6	676,8	887,8
V4	567,3	555,6	807,8	786,5	1048,3	1017,3	806,5	762,0
V5	480,6	586,5	682,2	835,9	883,9	1085,4	664,6	789,3
V6	443,1	447,6	626,7	626,9	810,3	806,1	623,1	619,3
V7	496,8	454,9	710,6	639,7	924,4	824,4	691,9	610,1
V8	385,0	581,4	545,0	825,9	705,0	1070,3	519,8	747,5

Conforme mencionado no item Material e Métodos, a alteração no projeto original para a lâmina de 125% se deu em função da possibilidade de contaminação das parcelas submetidas a lâminas restritivas. A alteração neste tratamento promoveu reduções gradativas na lâmina inicial até ser alcançada uma fração de 50% da lâmina do tratamento referência (L100). A Figura 37 apresenta graficamente o comportamento da demanda hídrica entre as oito variedades estudadas nos dois ciclos de cultivo.

Figura 37 – Demanda hídrica (parcela experimental) das oito variedades estudadas nos quatro regimes de irrigação impostos, para o ciclo da cana-planta e cana-soca.

No que se refere às estimativas do coeficiente de cultivo (K_c), seus valores foram determinados a partir da relação entre a lâmina de irrigação real disponibilizada para as variedades e a ETo , e estão apresentados na Tabela 20, na forma de valores médios para as oito variedades, durante os dois ciclos de cultivo.

Os valores médios de K_c variaram entre 0,48 e 0,67, observando-se os menores valores para a variedade V6 e os maiores para V2; a média para os dois ciclos de cultivo foi de 0,57. Entretanto, quando se leva em consideração apenas o tratamento com 100% de reposição hídrica, o qual rotineiramente é utilizado para determinação do K_c , os valores foram significativamente superiores, e variaram entre 0,55 e 0,93, com média de 0,74. Valores similares foram verificados por Carmo (2013), em estudos com a variedade RB 92579 no semiárido baiano, também irrigada por gotejamento.

Tabela 20 – Valores estimados de Kc médio para oito variedades de cana-de-açúcar, submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica nos ciclos da cana-planta e cana-soca

Variedade	L100		L75*		L75		L50	
	Cana Planta	Cana Soca	Cana Planta	Cana Soca	Cana Planta	Cana Soca	Cana Planta	Cana Soca
V1	0,82	0,72	0,62	0,56	0,63	0,55	0,44	0,39
V2	0,81	0,93	0,62	0,70	0,63	0,71	0,44	0,49
V3	0,70	0,90	0,52	0,68	0,54	0,69	0,38	0,48
V4	0,81	0,75	0,62	0,59	0,63	0,58	0,44	0,41
V5	0,68	0,81	0,51	0,62	0,53	0,62	0,37	0,43
V6	0,63	0,60	0,48	0,48	0,49	0,47	0,34	0,33
V7	0,72	0,61	0,54	0,47	0,55	0,47	0,38	0,33
V8	0,55	0,78	0,40	0,57	0,42	0,60	0,30	0,42

Na Figura 38 são apresentados os coeficientes de cultivo médios das oito variedades, submetidas aos quatro níveis de regime hídrico e para as quatro épocas de corte das plantas de cana-de-açúcar, durante o ciclo da cana-soca.

Os valores de Kc determinados durante as quatro épocas de corte variaram entre 0,27 e 1,21; sendo o primeiro valor observado na variedade V6, durante o 4º corte, e o segundo para a V2, por ocasião do 3º corte.

Especificamente para a lâmina de 75*, os valores de Kc observados para o 1º corte podem ser negligenciados, tendo em vista que durante a realização desta colheita as plantas deste tratamento estavam submetidas a uma lâmina excedente. Ainda com relação ao tratamento de lâmina variável, é possível notar também que os valores de Kc observados tanto no 3º quanto 4º cortes, são apresentados de forma sobreposta aos do Kc provenientes de variedades submetidas a lâmina de 50%, uma vez que nestas fases do cultivo as lâminas eram idênticas. Para as demais lâminas, o comportamento quanto aos valores do Kc estão coerentes, tendo as variedades que estavam submetidas a lâmina de irrigação de 100% apresentado as maiores taxas de evapotranspiração.

As variedades V2, V3, V5 e V8 foram as únicas que apresentaram taxas de evapotranspiração maiores que a demanda evapotranspirométrica promovida pelo microclima da estufa. Os maiores valores foram observados aos 204 DAC para a variedade V5, e aos 286 DAC para as variedades V2 e V8. A variedade V3 apresentou a mesma taxa de evapotranspiração no intervalo compreendido pela 2ª e 3ª colheitas.

A Figura 39 apresenta os valores de K_c apenas para os tratamentos de lâminas com o máximo de reposição hídrica (L100), os quais foram divididos em quatro fases de desenvolvimento, definidas como sendo os intervalos entre as colheitas.

A fase inicial compreendeu o primeiro quarto do segundo ciclo, e apresentou K_c médio de 0,48, o qual foi significativamente inferior ao 0,65 verificado por Silva (2011), em estudos com a variedade RB92579, e superior ao encontrado no boletim 56 da FAO ($K_c \sim 0,40$). Provavelmente, as diferenças observadas nos três valores de K_c podem estar relacionadas ao método de irrigação adotado, que influencia a componente de evaporação e, também, a duração do período considerado como fase representativa do K_c .

Para as fases de desenvolvimento vegetativo e intermediária, os valores médios de K_c foram 0,92 e 0,94, respectivamente. Nestas fases, caracterizadas como as de maior incremento de área foliar, o valor do K_c para a variedade V2 chegou a alcançar a marca de 1,21, superior em 30% o valor médio para as duas fases. Notadamente, a variedade 2 foi a que apresentou os maiores valores de área foliar, conforme será visto no próximo tópico.

Figura 38 – Coeficientes de cultivo para as oito variedades e quatro épocas de corte durante o ciclo da cana soca

Na fase final, verificou-se que os valores de K_c reduziram-se, apresentando valor médio de 0,72, semelhante ao valor informado no Boletim 56 da FAO ($K_c = 0,75$). Resultados similares também foram obtidos por Silva et al (2013), utilizando o método do balanço hídrico no solo, para irrigação da cana com equipamento pivô central (K_c final = 0,76).

Figura 39 – Coeficientes de cultivo para as oito variedades submetidas ao tratamento L100 em quatro épocas de corte (amostragem), durante o ciclo da cana-soca

4.4 Dinâmica da área foliar

A dinâmica da área foliar observada nas oito variedades, sobre quatro condições de disponibilidade hídrica e para as quatro épocas de corte realizadas no ciclo da cana-soca, está representada na Figura 40.

Na análise dos valores de área foliar total da parcela (folhas verdes + folhas secas), observou-se variações entre 0,81 e 4,23 m², sendo estes valores verificados no primeiro e último corte, respectivamente. Durante o 1º e 2º corte, os quais compreenderam a primeira metade do ciclo da cana-soca, verificou-se diferença significativa ($p < 0,01$) entre lâminas apenas para as variedades V2 e V4, aos 106 DAC, o que sugere baixa influência das variações de disponibilidade hídrica sobre a área foliar entre variedades, tendo estas apresentado comportamento bastante similar, especificamente para as duas primeiras fases do cultivo. Esses resultados diferem dos encontrados por Pincelli (2010) e Holanda (2012), os quais observaram diferenças significativas quando estudaram o efeito de diferentes regimes hídricos sobre quatro variedades de cana-de-açúcar, cultivadas até os 140 dias. Provavelmente, a causa de tal comportamento neste estudo, tenha sido as temperaturas mais amenas registradas entre

os meses de maio e agosto, promovendo assim menor variação desta variável; outra causa admissível, são os valores elevados do coeficiente de variação para estes dois cortes (28% para o 1º corte e 34% para o 2º corte), que segundo Pimentel Gomes (2000), podem significar baixa precisão por não discriminar as diferenças estatísticas entre os tratamentos.

Acerca dos elevados valores observados do coeficiente de variação, deve-se levar em consideração que a ocorrência de elevada variabilidade nos valores de área foliar foi comum à maioria das variedades, independentemente do tratamento de disponibilidade hídrica imposto e fase de cultivo avaliada, isso pode ser atribuído à complexidade da herança genética na cana-de-açúcar que, sendo uma planta altamente heterozigótica, apresenta razoável variabilidade fenotípica, mesmo se tratando de clones (MANCINI, 2010).

A variabilidade da área foliar total em cada um dos quatro cortes pode ser verificada na Figura 41, a partir de gráficos box plot para as oito variedades estudadas.

Quanto aos valores de área foliar entre variedades, ainda para os dois primeiros cortes, houve diferença estatística ($p < 0,01$), com as variedades V5, V6 e V7 compondo o grupo de menor área foliar para o 1º corte. No 2º corte, houve um incremento médio da área foliar de 28%, na comparação com o corte anterior, sendo as variedades V2 e V6 as que apresentaram o maior e menor valor de área foliar, com 1,97 e 0,92 m², respectivamente. Esse comportamento manteve-se inalterado durante os cortes seguintes, o que fez com que a variedade V6 permanecesse como a de menor expressão para essa variável durante todo o ciclo.

Somente a partir do 3º corte foi possível notar as maiores diferenças entre os dois fatores estudados; especificamente para o efeito das diferentes lâminas de irrigação sobre a área foliar, notou-se que, de modo geral, o déficit hídrico reduziu essa variável em todas as variedades, sendo a diferença entre as lâminas restritivas e a de 100% da DHp, mais pronunciadas aos 376 DAC, época do 4º corte.

No tocante às diferenças entre variedades, observou-se que o 4º corte foi o que apresentou o maior número de diferenciações, sendo formados quatro grupos de variedades para a variável área foliar total, sendo eles: V2>V3>V1-V4-V5-V7-V8>V6.

Figura 40 – Área foliar total da parcela experimental (folhas secas + folhas verdes) das oito variedades estudadas e submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica no solo. Lâminas identificadas com letras minúsculas distintas e variedades identificadas com letras maiúsculas distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

É interessante notar que a hierarquia observada para a área foliar na fase final do ciclo é exatamente a mesma verificada para o consumo hídrico (Figura 36), uma vez que, quanto maior a massa foliar, maior também é a quantidade de água necessária para a realização das trocas gasosas com a atmosfera (PIRES et al., 2008).

Além da área foliar propriamente dita, outro aspecto a ser analisado é a taxa de senescência foliar, que de acordo com Smit e Singels (2006) é responsiva ao déficit hídrico e pode ser considerada como uma estratégia da planta para diminuir a superfície transpirante e o gasto metabólico para a manutenção dos tecidos. A área foliar total observada no final do ciclo, evidencia a afirmação dos autores supracitados, apresentando valores díspares entre a lâmina de 100% e as demais condições hídrico-restritivas. As variedades submetidas ao tratamento com 50% da DHp apresentaram, em média, apenas 40% da área foliar das plantas conduzidas sem restrição hídrica, o que inevitavelmente implica em menores rendimentos. Para os tratamentos de 75% e 75%*, ambos com consumo hídrico acumulado similar, a área foliar foi, em média, 65% da referência de 100% da DHp.

Quanto ao índice de área foliar (IAF), a Figura 42 apresenta a evolução deste indicador durante as quatro épocas de corte, para as oito variedades conduzidas sem restrição hídrica. Nota-se que aos 106 DAC, época da realização do 1º corte, a variedade V4 foi a que apresentou o maior valor de IAF (2,6), além do fato de ter sido a única que não apresentou senescência foliar nesta fase do cultivo. O valor médio de IAF para folhas verdes (IAF_{fv}) nesta 1ª fase foi de 1,8.

No 2º corte, houve um incremento de 18% no valor médio do IAF_{fv} na comparação com o corte anterior, que passou a apresentar um índice de 2,13. Nesta fase a variedade V2 exibiu o maior valor de IAF, mantendo-se dessa forma no 3º corte, e ficando atrás apenas da variedade V3 na quarta e última fase do cultivo.

De modo geral, os maiores valores de IAF_{fv} foram verificados por ocasião do 3º corte, com média de 3,34 para as oito variedades. Valores similares foram encontrados por Farias et al. (2007) e Vieira et al. (2014), ambos em experimentos com cana irrigada. No entanto, os valores obtidos neste estudo foram inferiores aos encontrados por Farias (2008) e Silva et al. (2012), os quais obtiveram índices de 6,41 e 5,55 m² m⁻², respectivamente.

Com relação aos valores de índice de área foliar total (IAF_{ft}) plotados na Figura 42, estes indicam apenas uma ordem de grandeza do IAF quando aplicado para a área foliar total, mas não possuem significado prático, tendo em vista que o IAF normalmente é mensurado como área fotossinteticamente ativa.

Figura 42 – Área foliar fotossinteticamente ativa (folhas verdes) e área foliar de folhas secas na parcela experimental. Índice de Área Foliar (IAF) para as oito variedades estudadas, submetidas a reposição hídrica de 100%. (IAF_{fv} – folhas verdes; IAF_{ft} – folhas totais (secas + verdes)).

De acordo com Oliveira et al. (2007), diversas variáveis influenciam o IAF, entre essas, o número de perfilhos, o número de folhas verdes, o tamanho e a largura destas folhas, a eficiência fotossintética delas, além da influência dos genótipos e dos fatores ambientais. No tocante apenas ao número de folhas verdes expandidas (NFVE), nota-se a, partir da Figura 43, a existência de razoável variabilidade entre as variedades estudadas, com valores oscilando entre 6,7 e 13,7, para as variedades V1 e V6, respectivamente. O valor médio para essa variável foi de 8,8.

Figura 43 – Número de folhas verdes (NFVE) expandidas no perfilho amostrado para cada uma das oito variedades estudadas, sob lâmina de 100% ao longo das quatro épocas de corte

Curiosamente, a variedade V6, a qual apresentou o menor valor de área foliar em três das quatro fases de cultivo da cana-soca, foi a que apresentou o maior NFVE, certamente por possuir folhas menores que as demais variedades. Outro aspecto que também merece atenção, é a ausência de comportamento declinatório para a taxa de emissão foliar observado em algumas variedades, a exemplo das variedades V1 e V5, que mantiveram praticamente constante seu NFVE ao longo das etapas de corte. Normalmente, observa-se um comportamento quadrático para essa variável, conforme observado por Silva et al. (2012); entretanto, os resultados obtidos nesse estudo sugerem que esse comportamento depende da variedade, bem como da relação fonte-dreno que é inerente a cada material.

Conforme anteriormente mencionado, o tamanho e largura das folhas também são variáveis que influenciam no IAF das variedades de cana-de-açúcar. Dessa forma, é de se esperar que exista variação entre áreas de folhas individuais bem como entre suas dimensões. Para tanto, a Figura 44 apresenta o fator de forma médio, para as 4 épocas de corte, das oito variedades estudadas e submetidas a condições de irrigação com lâmina de 100% da DHp.

Figura 44 – Fator de forma da folha +3 (média dos quatro cortes), para as oito variedades de cana-de-açúcar estudadas e submetidas ao tratamento de irrigação com lâmina de 100% da DHp, no ciclo de cana-soca. Regressões significativas a 5% de probabilidade (teste F)

O fator de forma é um coeficiente normalmente utilizado para estimativa da área foliar de culturas diversas e é obtido pelo ajuste da regressão linear entre as medidas da área foliar e o produto do comprimento pela largura das folhas. O coeficiente angular resultante desse polinômio de primeiro grau quando forçado a passar pela origem é a variável que representa o fator de forma.

Para a estimativa da área foliar em cana-de-açúcar, a metodologia de Hermann e Câmara (1999) tem sido bem aceita, e por isso amplamente utilizada em vários estudos que visam determinar essa variável. Na proposta destes autores, as medidas foliares devem ser tomadas na folha +3, conforme numeração do sistema de Kuijper, e o fator de forma a ser utilizado é o 0,75.

Neste estudo, observou-se que os valores do fator de forma variaram entre 0,60 a 0,66, os quais apresentaram coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,82, indicando que os fatores de forma obtidos permitem explicar a maior parte da variabilidade da área foliar. A variedade V7 foi a que exibiu o maior fator de forma (0,66), sendo também a que apresentou os maiores valores de área foliar individual. No entanto, todos os valores observados ficaram abaixo do valor sugerido por Hermann e Câmara (1999).

Diversos autores têm encontrado fatores de forma diferentes do proposto por Hermann e Câmara (1999), valores estes que variam entre 0,62 (ROBERTSON et al., 1998) até 0,79 (TOLEDO FILHO, 2001). Dessa forma, conforme observações de Simões et al. (2013) e Ferreira Junior (2014), existem variações no valor do fator de forma entre as variedades de cana-de-açúcar, portanto, a utilização de fatores específicos pode gerar estimativas de área foliar mais consistentes.

Por fim, como última variável investigada neste item sobre dinâmica da área foliar, serão apresentados os resultados para a área foliar específica (AFE), que é um indicador que permite avaliar se as plantas estão acumulando fotoassimilados em suas folhas ou translocando-os para outros órgãos. A Figura 45 mostra o comportamento da AFE para as oito variedades estudadas, submetidas a quatro diferentes condições de disponibilidade hídrica no solo, para as quatro épocas de corte.

Observa-se que a AFE praticamente não variou entre os tratamentos de lâminas ao longo dos três primeiros cortes, apresentando maior variação para este fator apenas no 4º corte. Nesta última fase, os valores de AFE entre lâminas chegaram a dobrar para algumas variedades, quando se compara o tratamento sem restrição hídrica com os de lâminas deficitárias. As diferenças visualizadas nestes tratamentos, ocorreram em função do retardo da senescência foliar promovido pelo tratamento de irrigação com lâmina de 100%.

Figura 45 – Área foliar específica (AFE, cm² g⁻¹) das oito variedades estudadas, submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, para as quatro épocas de corte durante o ciclo da cana soca.

Em relação às diferenças entre variedades, notou-se que a V2 e V4 apresentaram os maiores valores, enquanto a V5 e V6 ficaram com os menores de AFE. As demais exibiram comportamento intermediário. A média da AFE para o 1º corte foi de $103,0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ e para o último corte de $52,0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, sendo que a magnitude destes valores retrata a forte relação fonte/dreno existente entre as folhas e o colmo no final do ciclo, o que faz deste último um importante demandador da energia acumulada nas folhas ao longo da segunda metade do cultivo. Resultados semelhantes foram observados por Anziliero et al. (2014). No tocante aos valores de AFE para a 2ª e 3ª etapa de corte, estes foram similares, com $80,0$ e $81,0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, respectivamente.

De modo geral, este estudo mostrou que os valores de AFE foram decrescendo com o desenvolvimento da cultura, mostrando que a cana-de-açúcar transloca suas reservas das folhas para outras partes da planta, principalmente para os colmos, conforme foi verificado por Machado (1982) e Silva et al. (2005).

4.5 Acúmulo e particionamento da biomassa seca da cana-de-açúcar

De acordo com Tejera et al. (2007), estudos sobre análises do crescimento da cana-de-açúcar, em termos de produção de biomassa e suas partições, bem como suas dinâmicas, podem ser de grande importância para melhor entender os mecanismos que promovem o aumento da eficiência produtiva da cultura em resposta às condições ambientais.

Este tópico apresenta a biomassa total da parte aérea para os dois ciclos de cultivo, e ainda a evolução no particionamento do fotoassimilado ao longo das quatro épocas de corte realizadas no ciclo da cana-soca. Especificamente para a 2ª fase do cultivo, a biomassa total da parte aérea (BTPA) foi dividida em cinco componentes, sendo eles: folhas, bainhas, colmos, desponte e perfilhos improdutivos/mortos; não havendo distinção entre partes verdes e secas, tendo sido adotada como base de apresentação a matéria seca. Particularmente para o 1º corte, para o qual não houve desponte e perfilhos mortos, serão apresentados apenas as outras três frações da planta de cana-de-açúcar.

No tocante ao acúmulo de biomassa seca total da parte aérea verificado entre os dois ciclos, notou-se que não houve diferença estatística entre ambos, sendo o valor médio obtido para os dois períodos igual a 5954 g m^{-2} , conforme pode ser observado na Tabela 21, a qual sumariza os resultados de BTPA encontrados para todo o período experimental. Valores semelhantes aos observados nesta pesquisa também foram encontrados por Inman-Bamber et al. (2002) e Silva (2009), em estudos conduzidos com cana irrigada, durante o ciclo da cana-

soca. Os valores obtidos por ambos oscilaram entre 5000 e 6800 g m⁻² em experimentos realizados com as variedades australianas Q96 e Q117, e a brasileira RB 92579.

Tabela 21 – Análise de variância para a variável Biomassa Total da Parte Aérea (BTPA) de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca).

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Bloco (B)	2	10972700,18	5486350,09	3,38 ^{ns}
Ciclo (C)	1	161283,91	161283,91	0,099 ^{ns}
Resíduo (a)	2	3249491,19	1624745,60	-
Lâmina (L)	3	218528708,66	72842569,55	49,61 ^{** 1}
C x L	3	10178875,73	3392958,56	2,31 ^{ns}
Resíduo (b)	12	17619198,48	1468266,54	-
Variedades (V)	7	76373590,44	10910512,92	17,68 ^{** 1}
C x V	7	87513440,41	12501920,06	20,26 ^{** 1}
L x V	21	25751359,15	1226255,20	1,98 ^{* 1}
C x L x V	21	16621461,95	791498,18	1,28 ^{ns}
Resíduo (c)	112	69107181,99	617028,41	-
CV% (a)	Parcela		21,41	
CV% (b)	Sub-parcela		20,35	
CV% (c)	Sub-subparcela		13,19	
Média Geral			5953,96	

GL – Graus de Liberdade; SQ – Soma de Quadrados; QM – Quadrado Médio; CV% - Coeficiente de variação; ** – Significativo ao nível de probabilidade de 1%; * – Significativo ao nível de probabilidade de 5% de probabilidade; ns – não significativo

No tocante ao efeito das lâminas de irrigação sobre a BTPA, houve efeito significativo dentro dos ciclos, mostrando haver incremento de biomassa seca a medida em que se aumenta o volume de água disponibilizado às variedades. O valor médio para a condição de 50% da DHp foi de 4454 g m⁻², o qual representou apenas 60% da BTPA verificada no tratamento sem restrição hídrica (DHp de 100%), que foi de 7394 g m⁻². Quanto aos tratamentos de 75% e 75%*, estes apresentaram rendimentos intermediários, com valores de 6321 e 5646 g m⁻², respectivamente.

Ainda em relação aos rendimentos verificados para os tratamentos de 75% e 75%*, nota-se que a diferença entre eles foi expressiva, no entanto não era esperada, tendo em vista que eles receberam volumes de água similares, como pode ser verificado na Tabela 18. A causa provável para tal comportamento pode ter sido um ajustamento fisiológico desenvolvido pelas plantas submetidas ao tratamento de lâmina de 75%, que estando adaptadas a mesma condição hídrico-restritiva ao longo de todo o ciclo de cultivo, conseguiram ser mais eficientes no uso da água. Por outro lado, as plantas submetidas ao tratamento de lâmina variável (75%*), as quais receberam lâminas de irrigação cada vez mais restritivas, não conseguiram se ambientar da mesma forma, o que pode ter promovido a diferenciação na produtividade da BTPA.

No que se refere às variedades, observou-se efeito significativo para esta fonte de variação, tendo inclusive sido verificado interação entre lâminas e ciclos. Na análise de todo o período experimental (dois ciclos de cultivo), verificou-se que a variedade V2 foi a mais produtiva com valor médio de BTPA de 7062 g m^{-2} , valor esse superior em 38% ao apresentado pela variedade V6, que foi a menos produtiva.

Quanto à influência das lâminas de irrigação sobre as variedades, observou-se que as variedades V1, V2 e V3 foram as mais produtivas na condição de disponibilidade hídrica mais restritiva, com valores de BTPA iguais a 5039, 5001 e 4924 g m^{-2} , respectivamente. Esse mesmo comportamento foi verificado também no tratamento de irrigação sem restrição hídrica, no qual as três variedades apresentaram produtividade da ordem de 8000 g m^{-2} . De forma resumida, a Figura 46 apresenta, graficamente, os resultados obtidos pelos três fatores estudados e que foram anteriormente exibidos na Tabela 21.

Figura 46 – Biomassa seca total da parte aérea para as oito variedades de cana-de-açúcar, submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, ao final dos ciclos da cana-plantar e cana-soca

Especificamente para o ciclo da cana-soca, no qual se avaliou a evolução da BTPA ao longo de quatro épocas de amostragem, observou-se que o efeito do tratamento de irrigação não foi verificado apenas no 1º corte, sendo três as causas prováveis: (i) o período de 30 dias após o corte da cana-planta em que foi realizada irrigação sem restrição hídrica em todo experimento, para que as plantas pudessem se estabelecer; (ii) as temperaturas mais amenas registradas no mês de corte; e (iii) o elevado coeficiente de variação (36,5%) que pode ter impossibilitado a “visualização” de diferença estatística. Quanto aos demais cortes, houve diferenciação entre lâminas, inclusive, com efeito mais pronunciado por ocasião da 3ª avaliação, época em que o crescimento se deu de forma mais acentuada.

O resumo da ANOVA para as quatro épocas de corte durante o ciclo da cana-soca está apresentado na Tabela 22, e a aplicação do teste de média de Scott-Knott na Tabela 23.

Tabela 22 – Resumo da análise de variância para a variável Biomassa Total da Parte Aérea (BTPA) de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo e quatro épocas de corte, durante o ciclo da cana-soca

Fonte de Variação		Biomassa Seca Total da Parte Aérea (4 épocas de corte)			
		1º Corte	2º Corte	3º Corte	4º Corte
		Valores de F			
Parcela	Blocos (B)	1,345 ^{ns}	0,049 ^{ns}	1,543 ^{ns}	0,377 ^{ns}
	Lâminas (L)	3,775 ^{ns}	16,189*	39,418**	13,487*
Sub-parcela	Variedades (V)	6,440**	1,241 ^{ns}	20,659**	14,366**
	(V) x (L)	1,180 ^{ns}	0,752 ^{ns}	1,908*	1,566 ^{ns}
CV(%)	Parcela	36,47	31,48	18,88	23,28
	Sub-parcela	22,31	26,13	11,07	15,62
Média geral		783,46	2433,13	4247,15	5982,94

** – Significativo ao nível de probabilidade de 1%; * – Significativo ao nível de probabilidade de 5% de probabilidade; ns – não significativo; CV(%) – Coeficiente de Variação

Tabela 23 – Teste de média para a variável Biomassa Total da Parte Aérea (BTPA) de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo e quatro épocas de corte, durante o ciclo da cana-soca

1º CORTE		2º CORTE		3º CORTE		4º CORTE	
Lâmina	BTPA	Lâmina	BTPA	Lâmina	BTPA	Lâmina	BTPA
50%	651,19 a	50%	1683,14 b	50%	2989,40 d	50%	4718,18 b
100%	762,79 a	75%	2187,93 b	75%*	4016,02 c	75%*	5593,02 b
75%	793,16 a	75%*	2744,49 a	75%	4530,90 b	75%	6536,80 a
75%*	926,68 a	100%	3116,98 a	100%	5452,27 a	100%	7083,80 a
Variedade	BTPA	Variedade	BTPA	Variedade	BTPA	Variedade	BTPA
7	575,11 b	7	2032,04 a	7	3203,74 d	7	4436,06 c
5	672,04 b	4	2261,24 a	6	3814,93 c	6	4984,94 c
8	711,21 b	8	2414,20 a	4	3967,60 c	4	5639,58 b
4	773,68 a	6	2462,13 a	1	4030,03 c	1	5695,62 b
2	816,29 a	2	2489,74 a	5	4312,03 b	5	6008,87 b
3	861,33 a	5	2522,16 a	8	4727,06 a	8	6547,33 a
6	883,48 a	1	2604,61 a	3	4884,20 a	3	7094,61 a
1	974,50 a	3	2678,96 a	2	5037,59 a	2	7456,58 a

Variedades e lâminas identificadas com letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott

Para os cortes em que houve diferença estatística, os valores de BTPA obedeceram, de modo geral, a seguinte sequência decrescente: L100>L75>L75*>L50. A exceção ficou por conta do 2º corte, o qual apresentou uma inversão entre as lâminas de 75% e 75%*; isso provavelmente ocorreu porque a lâmina de 75%* só passou a ser igual a L50 depois de realizado o 2º corte; esse procedimento fez parte do manejo adotado com a finalidade de igualar os volumes aplicados para as lâminas de 75%* (L125) e 75%, conforme já detalhado na metodologia.

Em relação ao comportamento das variedades, verificou-se que a variedade V2 foi a mais produtiva, desempenho esse que já havia sido constatado na análise conjunta dos dois ciclos de cultivo. No entanto, percebe-se que as maiores produções durante o cultivo da soca só foram verificadas a partir do 3º corte; no 1º e 2º cortes, as maiores produtividades foram das variedades V1 e V3, respectivamente. Quanto à variedade menos produtiva, observou-se que essa posição coube a V7, a qual apresentou os menores rendimentos ao longo das quatro épocas de amostragem. Vale ressaltar que, na análise dos dois ciclos de cultivo, a variedade V6 foi a que apresentou as menores produções.

No que se refere ao efeito da interação entre lâminas e variedades observado no 3º corte, o qual é apresentado nos desdobramentos constantes na Tabela 24; nota-se que a variedade V2 poderia ser irrigada com uma lâmina 25% menor do que a demanda potencial da cultivar, e ainda assim produziria de forma satisfatória, tendo em vista que não houve diferença estatística para essa variedade entre as L100 e L75. Este mesmo comportamento também foi observado durante o 4º e último corte do cultivo.

Tabela 24 – Desdobramento da interação Lâmina x Variedade para a variável Biomassa Total da Parte Aérea (BTPA) durante a 3ª época de amostragem no ciclo da cana-soca

LÂMINA	VARIEDADES							
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
50%	2774,1bC	3484,8aC	3306,7aC	2548,5bC	3183,0aB	2681,3bC	2184,5bB	3752,2aB
75%*	4373,4aB	4330,6aB	4674,5aB	3740,1bB	3576,9bB	3706,4bB	3367,1bA	4359,2aB
75%	3957,4cB	6091,5aA	5179,6bB	3997,1cB	4905,3bA	3770,0cB	3313,2cA	5033,2bA
100%	5015,2bA	6243,5aA	6375,9aA	5584,8aA	5582,9aA	5101,9bA	3950,2cA	5763,7aA

Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

A exemplo do que foi apresentado na análise conjunta dos dois ciclos de cultivo, adotou-se também para o ciclo da cana-soca a representação gráfica da dinâmica da BTPA, a qual é demonstrada na Figura 47 e tem como objetivo complementar as informações constantes nas Tabelas 21, 22 e 23.

Figura 47 – Biomassa seca total da parte aérea para as oito variedades de cana-de-açúcar, submetidas a quatro diferentes condições de disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cana-soca

Com relação ao particionamento da BTPA nas quatro épocas de amostragem realizadas durante o ciclo da cana-soca, as Figuras 48, 49, 50 e 51 apresentam as proporções dos componentes da planta para as oito variedades de cana-de-açúcar submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica.

Figura 48 – Particionamento da biomassa seca total da parte área de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 106 DAC (1ª Amostragem)

No 1º corte, observou-se uma maior alocação da matéria seca para as folhas, as quais receberam cerca de 48% de todo fotoassimilado produzido até os 106 dias após o corte da cana-planta; as bainhas e hastes/colmos receberam 29 e 22%, respectivamente. Segundo Machado et al. (1983), a intensidade de crescimento foliar na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar é o fator mais importante na biomassa acumulada, tendo, portanto, preferência na partição da matéria seca da parte área em relação aos colmos.

O mesmo autor, estudando a matéria seca acumulada nas folhas das variedades NA 56-79 e CB 41-14, relatou acúmulo até os 100 dias após o plantio, superior a 70% da matéria seca da planta nesta partição. Neste estudo, a variedade 7 foi a que mais se aproximou dos resultados verificados por Machado (1982), com as proporções de folhas em relação a biomassa acumulada até os 106 dias superior às demais variedades em todas condições de disponibilidade hídrica (61%), como pode ser observado na Figura 48; condição contrária foi verificada para a variedade 6.

Na análise entre lâminas, ainda para a fração correspondente as folhas, e adotando o tratamento de 100% como sendo o que representa o particionamento potencial das variedades para aquela idade, observou-se que a lâmina mais restritiva (50%) apresentou uma proporção idêntica à da referência, ficando os demais tratamentos com proporções 9 e 11% menores quando comparados com o padrão adotado (L100). Essa baixa variabilidade observada para o efeito da lâmina, já foi inferida anteriormente no texto e, provavelmente, é função do período de estabelecimento da cultura logo após a colheita da cana-planta, das temperaturas mais amenas verificadas por ocasião da 1ª amostragem e, ainda, em razão do elevado coeficiente de variação verificado nesta fase.

A partir do 2º corte, houve a inclusão de mais dois componentes da planta como representante da BTPA, o desponte e os perfilhos improdutivos/mortos, os quais apresentaram proporções médias de 18 e 11%, respectivamente. No tocante a fração correspondente às folhas, observou-se queda expressiva no 2º corte em relação ao corte anterior, com média geral de 0,15 (15%) para essa componente. Por outro lado, a representatividade do colmo elevou-se de forma igualmente significativa, saindo dos 0,22 observados no 1º corte e alcançando valores da ordem de 0,45. Resultados similares foram encontrados por Silva (2009) aos 180 dias de cultivo da variedade RB92579 conduzida sob irrigação. Entre as variedades, o comportamento da V6 e V7 manteve-se o mesmo, a primeira com a maior proporção na componente colmo, e a segunda na fração folha.

No que se refere ao efeito das lâminas de irrigação sobre as cinco frações estudadas, observou-se que as plantas submetidas ao tratamento sem restrição hídrica apresentaram as maiores proporções para a fração do colmo, no entanto, verificou-se comportamento inverso para os demais componentes da planta. Provavelmente, isso ocorreu em função da forte relação fonte/dreno existente entre o colmo e as demais frações da planta, sendo esta maximizada na inexistência de limitação hídrica.

Figura 49 – Particionamento da biomassa seca total da parte aérea de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 205 DAC (2ª Amostragem)

Para o 3º e 4º cortes, observou-se redução gradativa na biomassa das frações bainhas, desponte e perfilhos mortos, que, por sua vez, foram realocadas nas componentes folhas e colmo. Especificamente em relação às folhas, notou-se que no quarto e último corte houve aumento na proporção de biomassa direcionada para essa componente em relação aos cortes anteriores, onde havia sido verificado um gradiente decrescente. Comportamento semelhante foi encontrado por Inman-Bamber et al. (2002), quando estes estudavam o particionamento da biomassa em cultivares australianas e sul-africanas. Para as variedades N16 e NCo376, ambas conduzidas em condições de sequeiro, os autores encontraram frações para a componente *trash* de 0,31 e 0,36, respectivamente. Na literatura internacional, esse termo é frequentemente aplicado à soma das folhas e bainhas mortas, e para esta fração da biomassa seca, foi estabelecida relações com os resultados obtidos neste estudo.

No tocante ao efeito das lâminas de irrigação sobre a distribuição da biomassa seca nas cinco frações da planta de cana-de-açúcar estudadas, ainda para as duas últimas épocas de amostragem, notou-se que não houve variabilidade acentuada; no entanto, o tratamento de irrigação sem restrição hídrica foi o que apresentou as menores proporções na componente folhas, que por sua vez favoreceu a fração dos colmos, que teve sua proporção aumentada. Essa relação preferencial se torna mais intensa na fase final do ciclo da cana, em decorrência do processo de maturação, o que sustenta a condição de forte dreno atribuída aos colmos (MARCELIS, 1996; McCORMICK et al., 2009).

Especificamente em relação aos colmos, que é o principal componente da planta de cana-de-açúcar, os valores verificados para esta fração foram em média de 0,53, que pode ser considerado baixo quando se compara com resultados frequentemente apresentados na literatura (ROBERTSON, et al., 1996; INMAN-BAMBER et al., 2002; SILVA, 2009). Em uma revisão realizada por Singels et al. (2005), estes autores identificaram grande variabilidade para esta componente, com valores oscilando entre 0,59 a 0,91. Ainda segundo eles, a discrepância nos resultados obtidos se deve a diferentes métodos de medidas e determinações de biomassa.

Para o presente estudo, não está claro o que pode ter promovido o menor fracionamento para esta componente, no entanto, suspeita-se que o método de irrigação adotado possa ter sido o promotor de tal comportamento. A hipótese é a de que a elevada frequência de irrigação praticada possa ter permitido um maior desenvolvimento das estruturas vegetativas, que por sua vez passaram a atuar como drenos, não permitindo que os colmos atingissem proporções maiores, na comparação com as auferidas em outros trabalhos.

Figura 50 – Particionamento da biomassa seca de plantas de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 288 DAC (3ª Amostragem)

Figura 51 – Particionamento da biomassa seca de plantas de oito variedades de cana-de-açúcar em função das diferentes condições de disponibilidade hídrica adotadas, colheita realizada aos 376 DAC (4ª Amostragem)

Na Figura 52, são apresentadas as proporções de colmos e palha (folhas + bainhas + desponte + perfilhos mortos) observadas nos ciclos da cana-planta e cana-soca. Especificamente para a fração dos colmos sob tratamento de irrigação sem restrição hídrica, nota-se que os valores entre os dois períodos de cultivo diferem pouco, com o 1º ciclo apresentando uma média para esta componente de 63% e o segundo de 56%. A diferença entre ambos provavelmente ocorreu, em função das proporções observadas nos dois ciclos para a fração perfilhos mortos (1º ciclo – 2% e 2º ciclo – 9%); a maior quantidade de biomassa seca retida nessa componente durante a cana-soca supostamente inibiu maiores ganhos no colmo para esse mesmo ciclo.

Figura 52 – Frações da biomassa da parte aérea total para os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca) particionada em colmos e palha (folhas + bainhas + desponte + perfilhos mortos), para as oito variedades estudadas e submetidas ao tratamento de lâmina de irrigação de 100%

Uma outra abordagem para a representação da dinâmica do particionamento da BTPA é apresentada na Figura 53. Nessa, é desconsiderada a contribuição advinda dos perfilhos mortos, e leva-se em consideração apenas a biomassa dos perfilhos industrializáveis em condições potenciais, no que se refere à disponibilidade hídrica. Quanto a componente desponte, considerou-se o seu fracionamento em bainha, folhas e colmo, as quais foram redistribuídas para as demais estruturas da planta.

A partir da análise desta forma alternativa de apresentação, nota-se que o comportamento das variedades quanto à alocação da biomassa no decorrer do ciclo, não é uniforme, demonstrando haver diferenças, mesmo que sutis. Como exemplo, pode-se citar as diferenças observadas entre as variedades V6 e V7; a primeira com um particionamento preferencial para os colmos, enquanto a segunda priorizou as folhas. Esse tipo de informação é particularmente importante em pesquisas com modelos de simulação do crescimento de culturas, os quais visam à determinação de equações matemáticas que predigam com razoável precisão a quantidade de fotoassimilado acumulado e como se dá o seu particionamento.

Figura 53 – Frações da biomassa da parte aérea particionada em folhas, bainhas e colmos, para as oito variedades estudadas e submetidas ao tratamento de lâmina de irrigação de 100% (cana soca)

4.6 Índices tecnológicos e rendimento industrial da cana-de-açúcar

Dentre as muitas variáveis de ordem tecnológica e de rendimento industrial obtidas nos dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, neste tópico serão apresentadas apenas cinco, por entender que estas são as mais importantes no que concerne o objetivo principal deste estudo. Desta forma, a análise se dará com os parâmetros de qualidade do colmo: brix do caldo, porcentagem de fibra e ATR, e também com os indicadores de rendimento: TCH e RBA. Informações adicionais para as demais variáveis estudadas poderão ser obtidas em Barbosa (2015), especificamente para o ciclo da cana-planta.

A partir dos resultados da análise de variância apresentados na Tabela 25, nota-se que não houve interação apenas para a porcentagem de fibra no colmo, ficando as demais variáveis com interações em ao menos uma das quatro combinações testadas (C x L, C x V, L x V e C x L x V). Especificamente para as ocorrências de interações com o fator Ciclo, não serão realizados desdobramentos, tendo em vista que este é um fator independente, sobre o qual não se verifica controle; desta forma, serão apenas tecidos comentários acerca do comportamento do fator analisado entre os dois ciclos estudados.

Tabela 25 – Resumo da análise de variância para as variáveis Brix, ATR, Fibra, TCH e RBA de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca)

Fonte de Variação		Índices tecnológicos e de rendimento da cana-de-açúcar				
		Brix	ATR	Fibra	TCH	RBA
		F				
Parcela	Blocos (B)	13,129 ^{ns}	1,068 ^{ns}	21,855 ^{ns}	19,966 ^{ns}	2,737 ^{ns}
	Ciclos (C)	57,891 [*]	48,565 [*]	207,584 [*]	87,607 [*]	0,301 ^{ns}
Sub-parcela	Lâminas (L)	0,923 ^{ns}	0,625 ^{ns}	0,904 [*]	29,944 ^{**}	43,774 ^{**}
	C x L	0,485 ^{ns}	0,107 ^{ns}	0,468 ^{ns}	0,582 ^{ns}	1,458 ^{ns}
Sub-subparcela	Variedades (V)	22,755 ^{**}	17,284 ^{**}	24,734 ^{**}	21,659 ^{**}	19,272 ^{**}
	C x V	8,367 ^{**}	4,780 ^{**}	10,510 ^{ns}	15,033 ^{**}	19,475 ^{**}
	L x V	2,080 ^{**}	1,132 ^{ns}	2,140 ^{ns}	1,665 [*]	2,049 ^{**}
	C x L x V	2,315 ^{**}	1,405 ^{ns}	2,375 ^{ns}	1,215 ^{ns}	1,427 ^{ns}
CV(%)	Parcela	23,78	18,00	13,63	3,17	12,01
	Sub-parcela	25,65	18,49	6,27	6,02	8,36
	Sub-subparcela	10,88	8,84	7,22	2,81	5,47
Média Geral		16,31	112,52	10,72	160,53	17,79

ATR – Açúcar Total Recuperável; TCH – Toneladas de Colmo por Hectare; RBA – Rendimento Bruto de Açúcar; ** – Significativo ao nível de probabilidade de 1%; * – Significativo ao nível de probabilidade de 5%; ns – não significativo; CV(%) – Coeficiente de Variação

4.6.1 Brix do caldo

O valor médio do brix do caldo para todo período experimental foi igual a 16,31 °Brix, com os valores médios obtidos no ciclo da cana-soca apresentando-se maiores do que os verificados no primeiro ciclo de cultivo (cana-planta: 15,28 e cana-soca: 17,36). Estes valores, apesar de menores do que os 18% considerados como ideais para a industrialização (Brieger, 1968), estão coerentes com os valores de brix obtidos em colheitas realizadas em períodos quentes do ano, tendo em vista que as elevadas temperaturas reinantes nos meses que antecederam as colheitas deste experimento não favorecem o acúmulo de açúcares nos colmos.

A Figura 54 apresenta os valores médios de brix encontrados para cada uma das variedades estudadas, em seus respectivos ciclos de cultivo e lâminas de irrigação.

Figura 54 – Valores de brix do caldo para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca

Para o efeito das lâminas de irrigação e variedades, ambos apresentaram diferenças significativas ($p < 0,01$), inclusive com presença de interação. Os resultados para o desdobramento na interação L x V estão apresentados na Figura 55.

Figura 55 – Médias dos valores de brix do caldo para os dois ciclos de cultivo das 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

No tocante ao efeito das lâminas, nota-se que apenas as variedades V2 e V5 apresentaram diferenças significativas, demonstrando o baixo efeito do fator lâmina sobre a porcentagem de sólidos solúveis (brix), especificamente para as condições estudadas nesta pesquisa. Comportamentos similares foram obtidos por Moura et al. (2014), em estudos com a variedade RB 85-5453 submetida a cinco diferentes lâminas de irrigação. No entanto, o que se esperava, era um efeito benéfico da restrição hídrica sobre os valores de brix, tendo em vista o maior acúmulo de açúcares nas células do tecido parenquimoso dos colmos promovido por este tipo de estresse. Por outro lado, conforme já foi citado anteriormente, acredita-se que as plantas não estivessem fenologicamente prontas, o que pode explicar os menores valores de brix identificados neste estudo.

Quanto ao favor Variedades, observou-se que as cultivares V6 e V7 foram as que apresentaram os maiores valores de brix, independentemente da disponibilidade hídrica testada. A média destas duas variedades foi igual a 17,36 °Brix, superando em 17% a V8, variedade com as menores porcentagens de sólidos solúveis.

4.6.2 Açúcar Total Recuperável – ATR

Os resultados obtidos para a produção de ATR, principal unidade de medida da qualidade industrial da cana-de-açúcar, indicam que houve efeito significativo ($p < 0,05$) entre os ciclos da cana-planta e cana-soca, com a diferença entre eles alcançando a marca dos 20 kg t^{-1} (Figura 56). A produção média do primeiro ciclo foi de 102,33 kg t^{-1} e para o 2º de 122,70 kg t^{-1} .

Figura 56 – Valores de Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca

Apesar da produção no ciclo da soca ter aumentado de forma significativa, com incremento da ordem de 20%, este valor ainda está aquém dos 138,8 kg t^{-1} verificados na safra 2014/2015 para o estado São Paulo (CONAB, 2015), para o qual predomina cultivos de sequeiro. No entanto, resultados obtidos por Cardozo (2012), em seu estudo sobre modelagem da maturação da cana, sugerem que a época de colheita da cana-de-açúcar influencia de forma bastante significativa no rendimento da cultura, com variações do ATR de até 100%, quando se realiza a colheita em épocas mais apropriadas. Este mesmo autor verificou rendimento médio de 78 kg t^{-1} para o mês de março e de 157,8 kg t^{-1} sete meses

depois (outubro). Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo poderiam ser maiores caso a colheita fosse realizada em uma data posterior, conforme foi relatado por Barbosa (2015).

Em relação ao fator lâmina de irrigação, verificou-se que as diferentes condições de disponibilidade hídrica impostas, não influenciaram a variável ATR. No entanto, para o fator Variedades, houve diferenças significativas ($p < 0,01$), com a variedade V6 auferindo os maiores rendimentos ($125,9 \text{ kg t}^{-1}$), conforme é apresentado na Figura 57. Com os menores rendimentos, a exemplo do que foi observado durante a análise da variável brix, ficou a variedade V8, que exibiu produções de ATR da ordem de $98,9 \text{ kg t}^{-1}$.

Figura 57 – Rendimento de Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) para as oito variedades estudadas nos dois ciclos de cultivo. Ciclos identificados com letras minúsculas distintas dentro da mesma variedade e variedades identificadas com letras maiúsculas distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

4.6.3 Porcentagem de fibra da cana-de-açúcar

A fibra é definida como o conjunto de substâncias insolúveis em água, constituída, principalmente, de celulose, hemicelulose e lignina, sendo considerada um parâmetro importante, por envolver a sustentação da planta e também por dificultar a extração do caldo na usina (MARQUES, 2001). No que diz respeito aos usos da fibra após prensagem, tem-se dispensado atenção especial para as aplicações na cogeração e também como valerosa matéria-prima nas pesquisas com etanol de 2^a geração.

Os teores de fibra encontrados nesta pesquisa diferiram estatisticamente ($p < 0,05$) nos dois ciclos de cultivo, com os valores médios obtidos para a cana-planta e cana-soca iguais a

9,88 e 11,57%, respectivamente. Leal (2012), em seu estudo com 24 variedades de cana-de-açúcar conduzidas durante três ciclos, não observou tendência clara de aumento ou redução da porcentagem de fibra ao longo dos anos, tendo registrado valores médios de 11,27, 9,32 e 10,12%, para o 1º, 2º e 3º ciclo, respectivamente. Esses resultados sugerem que vários são os fatores que podem influenciar essa variável, os quais envolvem condições meteorológicas, umidade e fertilidade do solo, época de corte, método de determinação e ainda característica varietal, conforme sugerido por Fernandes (2003). No entanto, como apenas as condições meteorológicas e varietal não foram controladas neste estudo, isso faz delas as fontes de incerteza desta variável, especificamente para as condições deste estudo.

No que se refere ao efeito das lâminas sobre a porcentagem de fibra, notou-se que apenas a condição mais restritiva (L50) diferiu das demais, com média de 10,42% (Figura 58). Resultados diferentes dos verificados neste estudo foram obtidos por Carvalho et al. (2009) e Dalri et al. (2008), que não observaram diferença estatística para os teores de fibra das variedades SP 791011 e RB 75454, ambas submetidas a quatro diferentes lâminas de irrigação. Entretanto, apesar do presente estudo ter demonstrado haver efeito significativo entre lâminas, observou-se que a diferença entre elas foi de apenas 4%, o que demonstra a baixa sensibilidade dos teores de fibra a disponibilidade hídrica.

Figura 58 – Médias do percentual de fibras para as 8 variedades estudadas nos dois ciclos de cultivo. Ciclos identificados com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Com relação as diferenças varietais, estas foram significativas ($p < 0,01$), inclusive com a formação de três grupos de diferenciação (Figura 59). As variedades V1, V3, V5 e V6,

formaram o grupo com os maiores teores de fibra, com média de 11,22%. As variedades V2, V4 e V7 com média de 10,41%, foram as representantes do grupo intermediário, e a V8, isolada, foi a que apresentou o menor percentual de fibra (9,60%).

Os valores apresentados pelas oito variedades, não excedem o limite de 12,5% que é o recomendado para a manutenção energética das indústrias que processam a cana-de-açúcar (OLIVEIRA et al, 2009); isso é importante, por que segundo Castro e Kluge (2001), caso o teor de fibra nos colmos exceda 12,5%, ele poderá se tornar um fator antieconômico no processo industrial em plantas de usinas tradicionais, tendo em vista que as moedas destes estabelecimentos estão reguladas para níveis máximos de fibra desta ordem. Ainda de acordo com os autores, a cada acréscimo de 0,5% de fibra, ocorre redução de 10 a 20% no rendimento da moagem.

Figura 59 – Médias do percentual de fibras para as oito variedades estudadas nos dois ciclos de cultivo. Ciclos identificados com letras minúsculas distintas dentro da mesma variedade e variedades identificadas com letras maiúsculas distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

4.6.4 Toneladas de Colmos por Hectare – TCH

A produtividade média de colmos (TCH) obtida nesta pesquisa foi de 160,53 t ha⁻¹, sendo esse valor resultado de estimativa realizada a partir da extrapolação da área útil ocupada pela parcela, que foi igual a 0,62 m².

Em relação as médias entre ciclos, observou-se efeito significativo ($p < 0,05$) entre os cultivos, com a cana-planta produzindo 22% a mais que a cana-soca (Figura 60). No tocante a esse comportamento, não se sabe ao certo, se a baixa qualidade da água de irrigação,

identificada no terço final do ciclo da cana-soca, influenciou de forma negativa os rendimentos obtidos para aquele ciclo. No entanto, apesar da maioria das variedades ter apresentado produções menores, a variedade V3 apresentou incremento de 6% em sua produção na comparação com o ciclo da cana-planta. Esse resultado pode ter sido provocado por uma maior tolerância a sais dessa variedade ou simplesmente uma resposta diferente à variação ambiental, tendo em vista que nos estudos de Leal (2012) e Silva et al. (2014), ambos trabalhando com essa mesma cultivar, eles observaram comportamentos distintos para a variedade V3, no 1º e 2º ciclo de cultivo. Outro resultado que ajuda a refutar a hipótese de influência da salinidade, foi o encontrado nos ensaios realizados por Willadino et al. (2011), com duas variedades de cana-de-açúcar submetidas a estresse salino, onde os autores identificaram maior sensibilidade (menor tolerância) da variedade V3.

Figura 60 – Valores de Toneladas de Colmos por Hectare (TCH) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca

No tocante aos fatores Lâminas e Variedades, houve efeito significativo entre ambos ($P < 0,05$), sendo o desdobramento apresentado na Figura 61.

De modo geral, notou-se que o rendimento de colmos aumentou de forma proporcional ao volume de água disponibilizado às plantas, com o tratamento L100 apresentando as maiores produções, média de 208 t ha⁻¹, e o L50 as menores (119 t ha⁻¹).

Figura 61 – Médias dos valores de Toneladas de Colmos por Hectare (TCH) para os dois ciclos de cultivo das 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Para o tratamento sem restrição hídrica, o qual representa um ambiente de rendimento potencial da cultura, notou-se que as produtividades alcançadas são similares as obtidas em outras condições experimentais ótimas de cultivo da cana, onde foram atingidos rendimentos da ordem de 200 t ha⁻¹ (MAULE et al. (2001); DARLI et al. (2008); SÁNCHEZ-ROMÁN et al. (2015). Quanto às lâminas L75 e L75*, apesar das plantas submetidas a estes tratamentos terem recebido volume de água similar, houve diferenciação entre eles, com o L75 apresentando as maiores produtividades, provavelmente em função das maiores restrições imposta na segunda metade dos ciclos para o tratamento L75*.

Em relação às variedades, observou-se que nenhuma delas se sobressaiu sobre as demais dentro das quatro lâminas estudadas, embora as variedades V2 e V4 tenham apresentado os maiores rendimentos nas lâminas L100, L75 e L75*, com valores médios iguais a 235,5; 203,5 e 171,0 t ha⁻¹, respectivamente. Por outro lado, com os piores

rendimentos, ficou a variedade V7, sendo acompanhada pela V6 nos tratamentos de menor restrição hídrica (L100 e L75).

4.6.5 Rendimento Bruto de Açúcar – RBA

O rendimento médio de açúcar encontrado no estudo foi de $17,79 \text{ t ha}^{-1}$, com as médias entre os ciclos diferindo em apenas 2%, não havendo, portanto, diferença estatística entre a cana-planta e a cana-soca. Contudo, as médias alcançadas por algumas variedades permitiram que o teste estatístico identificasse interação entre estes dois fatores (Figura 62).

Figura 62 – Valores de Rendimento Bruto de Açúcar (RBA) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca

Com relação às lâminas de irrigação aplicadas, notou-se forte efeito significativo deste fator ($p < 0,01$), com as diferenças de rendimento entre a condição sem restrição hídrica e o ambiente mais restritivo alcançando $9,42 \text{ t ha}^{-1}$, como pode ser verificado na Figura 63A. As produtividades registradas para as lâminas L100, L75, L75* e L50 foram iguais a $22,74$; $18,56$; $16,55$ e $13,32 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente.

Resultados similares aos obtidos neste estudo também foram encontrados por Maschio (2011) e Leal (2012), quando estes conduziram estudos com 24 variedades de cana-de-açúcar, submetidas a duas condições de disponibilidade hídrica em ambiente protegido. A variação no rendimento observada por estes autores oscilou entre 26 e 80%, quando realizou-se a comparação das lâminas mais restritivas com a condição de irrigação plena.

Aumentos no RBA com o uso da irrigação também foram verificados em estudos de campo, como nos trabalhos desenvolvidos por Dantas Neto et al. (2006) e Carvalho et al. (2009), embora as diferenças auferidas nas condições estudadas não tenham alcançado 40%, tendo em vista a contribuição eventual das chuvas. Esses resultados evidenciam a importância da disponibilidade hídrica adequada para a cultura da cana, uma vez que isso implica em incrementos consideráveis no rendimento de açúcar.

No tocante às variedades, notou-se elevada variabilidade entre as oito cultivares, com a amplitude entre elas alcançando 47% de diferença relativa, como pode ser observado na Figura 63B. A variedade V2 foi a mais produtiva, apresentando rendimento médio de 21,52 t ha⁻¹, quanto aos rendimentos menos expressivos, eles foram representados pela variedade V8, a qual exibiu produtividade média de açúcar de apenas 14,63 t ha⁻¹.

Figura 63 – Rendimento Bruto de Açúcar médio para os ciclos da cana-planta e cana-soca. Efeito de lâminas (A) e comportamento varietal (B)

Na análise da Figura 64, a qual apresenta o comportamento varietal dentro de cada uma das lâminas de irrigação estudadas, nota-se que os valores de RBA alcançados estão diretamente relacionados com a produtividade de colmos auferida por cada uma das variedades, tendo em vista que não houve efeito das lâminas para a variável ATR, a qual juntamente com a TCH compõe a variável RBA. Sendo assim, de forma análoga aos comentários realizados para a variável TCH, observou-se que as variedades V2 e V4 foram as

mais responsivas à irrigação, tendo a primeira alcançado produtividades de açúcar acima de 25 t ha⁻¹, tanto para a L100 quanto para a L75, sendo nestas condições, estatisticamente iguais.

Rendimentos dessa magnitude são pouco relatados na literatura, mas também foram registrados por Maschio (2011) e Oliveira et al. (2011), quando conduziram experimentos em condições ótimas de disponibilidade hídrica. De acordo com Silva et al. (2014), este tipo de estudo auxilia na caracterização das variedades para condições distintas de ambiente de produção, uma vez que proporciona a identificação de respostas varietais potenciais, condicionadas apenas a distinção genética dos materiais. A variedade V2, por exemplo, destacou-se como a mais produtiva, respondendo positivamente ao elevado consumo hídrico deste material frente aos demais, tanto no primeiro, como no segundo ciclo de cultivo. Já a variedade V8, especificamente para o ciclo da soca, embora tenha apresentado o quarto maior consumo hídrico, exibiu rendimentos modestos de açúcar.

Figura 64 – Médias dos valores de Rendimento Bruto de Açúcar (RBA) para os dois ciclos de cultivo das 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

4.7 Índices de maturação e produção da cana-de-açúcar

Tanto o índice de maturação (IM) como o índice de colheita (IC), são importantes indicadores utilizados no cultivo da cana-de-açúcar. O primeiro é uma ferramenta que auxilia na identificação do momento mais oportuno para a realização da colheita, visando assim, o

melhor e maior aproveitamento da cana na usina (NEVES et al., 2010). Já o segundo é utilizado para medir a eficiência de conversão dos fotoassimilados em material de importância econômica, no caso do presente estudo, o açúcar.

O resumo da análise de variância para o IM e o IC estão apresentados na Tabela 26, e em ambos, observou-se efeito significativo para o fator Variedades, inclusive com presença de interação entre ciclos, especificamente para o Índice de Maturação ($p < 0,01$). Quanto ao fator Lâmina, não foi observada influência dos níveis de irrigação testados sobre estes dois índices, o que sugere não haver prejuízos para estes indicadores quando houver ocorrência de déficit hídrico, dentro dos intervalos explorados por esta pesquisa.

Tabela 26 – Resumo da análise de variância para os Índices de Maturação e Colheita, aplicados em oito cultivares de cana-de-açúcar conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo e durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca).

Fonte de Variação		Índices de Maturação e Colheita	
		F	
		IM	IC
Parcela	Blocos (B)	1,795 ^{ns}	0,280 ^{ns}
	Ciclos (C)	0,543 ^{ns}	0,454 ^{ns}
Sub-parcela	Lâminas (L)	0,485 ^{ns}	1,016 ^{ns}
	C x L	0,092 ^{ns}	0,912 ^{ns}
Sub-subparcela	Variedades (V)	10,294 ^{**}	8,812 [*]
	C x V	3,162 ^{**}	0,834 ^{ns}
	L x V	1,147 ^{ns}	0,797 ^{ns}
	C x L x V	1,267 ^{ns}	0,888 ^{ns}
CV(%)	Parcela	34,02	24,06
	Sub-parcela	19,84	11,46
	Sub-subparcela	11,03	8,07
Média Geral		0,65	26,63

IM – Índice de Maturação; IC – Índice de Colheita; ** – Significativo ao nível de probabilidade de 1%; * – Significativo ao nível de probabilidade de 5%; ns – não significativo; CV(%) – Coeficiente de Variação

4.7.1 Índice de Maturação

A média do índice de maturação para todo período experimental foi igual a 0,65, que segundo categorização proposta por DEUBER (1988), classifica as variedades como em processo de maturação.

A partir da análise da Figura 65, observa-se que houve a criação de quatro grupos de maturação após aplicação do teste de médias de Scott-Knott, sendo a variedade V2 a que apresentou os maiores valores para o IM, com média igual a 0,72. Essa variedade juntamente com a V6 são as únicas cultivares precoces, o que provavelmente ajuda a explicar os maiores valores exibido por elas.

Figura 65 – Índice de Maturação para as oito variedades estudadas, sob quatro diferentes lâminas de irrigação em dois ciclos de cultivo. Variedades identificadas com letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Quando a análise do IM é realizada de forma análoga à apresentada por Barbosa (2015) no primeiro ciclo de cultivo deste mesmo experimento, onde o autor apresentou a relação entre o Brix medido no terço médio superior e o Brix da base do colmo, como sendo a medida usual em campo, encontra-se valor médio de IM igual a 0,88, que segundo classificação apresentada por Deuber (1988) indica que a cana está madura. Contudo, observando-se a Figura 66, a qual mostra as duas formas de apresentação do IM, verifica-se que as variedades V5 e V8, ambas cultivares de ciclo tardio, foram as únicas que não alcançaram o limite mínimo (0,85) para classificá-las como maduras.

Figura 66 – Índice de Maturação a partir do Brix ponta/base e Brix médio superior/base

No que se refere a metodologia mais usual para a determinação do IM, a qual relaciona o Brix do ápice com o Brix da base do colmo, nota-se na literatura alguma subjetividade quanto ao local de determinação deste último, tendo em vista que não há consenso sobre qual é o entrenó a ser efetivamente utilizado. Viana et al. (2015), em estudos com maturadores químicos na cultura da cana, utilizou o segundo entrenó abaixo do ponto de quebra, o mesmo utilizado no presente estudo. No entanto, Moraes et al. (2011), avaliando a maturação de nove variedades de cana durante o primeiro ciclo de cultivo, utilizou o quarto entrenó abaixo do ponto de corte. Já Uchôa et al. (2009) e Moura et al. (2014) não especificaram qual o entrenó do ápice foi medido em seus trabalhos. Essas divergências na padronização metodológica para determinação do IM, incorre em uma grande variabilidade deste indicador, mesmo quando a cana-de-açúcar é explorada em condições similares de cultivo, não permitindo assim o estabelecimento de comparações válidas.

4.7.2 Índice de Colheita

A Figura 67 mostra que o índice de colheita diferiu significativamente entre as oito variedades estudadas ($p < 0,05$), conforme havia sido mostrado na apresentação do resumo da análise de variância (Tabela 26). O valor médio observado para todo período experimental foi igual a 26,63%, o qual está de acordo com os valores apresentados por Doorembos e Kassam (1979) no Boletim nº 33 da FAO, o qual exhibe participação do açúcar na biomassa seca oscilando entre 20 e 30%. Resultados semelhantes também foram obtidos por Thangavelu (2006), quando estudava o rendimento de açúcar de 30 clones de cana pertencentes a grupos de maturação distintos, na região sul da Índia.

No presente estudo, dentre as oito variedades avaliadas, a que mais se destacou no IC foi a V6, com 30,9% do seu peso seco sendo representado por açúcar. Dessa forma, sendo o IC uma medida da eficiência do transporte de fotoassimilados para o colmo, teoricamente, o maior IC observado para a variedade V6, sugere maior eficiência de conversão dessa cultivar frente as demais. No entanto, é preciso ponderação sobre conclusões a este respeito, uma vez que estudos tem mostrado que o IC de uma cultura é marcadamente influenciado pela densidade de plantio, disponibilidade de água e nutrientes e, temperatura na estação de crescimento, conforme verificado por Monteiro et al. (1998) na cultura do milho.

Em relação às outras variedades, os menores percentuais ficaram com o grupo composto pelas variedades V5, V7 e V8. Para o grupo intermediário, representado pelas variedades V1, V2, V3 e V4, os valores de IC foram similares à média experimental.

Figura 67 – Índice de Colheita para as oito variedades estudadas, sob quatro diferentes lâminas de irrigação (média da cana-planta e cana-soca). Variedades identificadas com letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Além do uso com medida de rendimento econômico, o índice de colheita também tem vasta aplicação nos programas de melhoramento genético, sendo amplamente utilizado na avaliação da performance de genótipos submetidos a diferentes condições climáticas. Outra aplicação que merece destaque, é seu uso em pesquisas sobre modelagem agrícola, tendo em vista a importância deste parâmetro como ferramenta de destinação da matéria seca estimada por modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento de culturas (DONALD e HAMBLIM, 1976).

Apesar da importância do IC como parâmetro utilizado na avaliação da adequabilidade das variedades a diferentes tipos de uso, uma análise mais abrangente deve ser adotada, considerando-se que o índice de colheita é uma medida relativa, podendo levar a interpretações incorretas na escolha do material a ser cultivado. Como exemplo, pode-se citar o caso da variedade V6, que apesar de possuir o maior índice de colheita dentre os oito materiais avaliados, ficou apenas com a 5ª colocação quando se realizou a hierarquização das variedades para a variável RBA, uma vez que a produção de colmos não foi tão expressiva quanto o acúmulo de açúcar.

De acordo com Hay (1995), a maioria dos principais cultivos de cereais já pode ter atingido o limite superior do índice de colheita e que futuros ganhos de rendimento terão de ser obtidos por meio de incrementos na produção de biomassa. Diante dessa informação, verifica-se que a cana-de-açúcar também já pode ter alcançado esse limiar, visto que as variedades apresentadas na Figura 67 exibiram baixa variabilidade de IC, mesmo tendo sido

desenvolvidas em diferentes épocas. As variedades avaliadas neste estudo foram desenvolvidas no período compreendido entre a década de 1950 até os anos 2000. Como exemplo, pode-se citar a variedade V2, que apesar de ter exibido os maiores rendimentos de colmo, foi lançada em 2008 e apresenta IC com melhoria “modesta” em relação a variedade V8, desenvolvida no ano de 1955.

Como forma de contribuir com pesquisas futuras relacionadas com índices de colheita para a cultura da cana-de-açúcar, a Tabela 27 apresenta os índices $IC_{A/B}$ e $IC_{C/B}$, os quais representam o rendimento econômico para açúcar e colmo, respectivamente. Este último índice, já foi apresentado de forma indireta no item que trata do acúmulo e particionamento da biomassa seca da cana-de-açúcar, no entanto, nessa nova forma de apresentação, são mostradas as variações deste índice em função dos tratamentos de irrigação impostos.

Tabela 27 – Índices de colheita baseados em açúcar ($IC_{A/B}$) e colmo* ($IC_{C/B}$) para oito variedades de cana-de-açúcar submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, durante os ciclos da cana-planta e cana-soca

Lâmina	Ciclo de Cultivo	Índices de Colheita	VARIEDADES								Média
			V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	
L50	Cana-Planta	$IC_{A/B}$	29,2	26,7	26,3	26,8	26,3	31,3	25,2	24,6	27,0
		$IC_{C/B}$	64,1	60,3	63,3	63,8	61,9	66,6	56,1	61,0	62,1
	Cana-Soca	$IC_{A/B}$	27,3	24,3	26,6	28,5	22,6	33,0	25,4	28,3	27,0
		$IC_{C/B}$	53,5	49,1	57,7	50,7	51,9	62,5	43,7	59,4	53,56
L75	Cana-Planta	$IC_{A/B}$	27,3	27,5	26,3	27,2	24,4	30,7	27,3	24,4	26,7
		$IC_{C/B}$	63,0	61,6	63,5	65,7	62,0	68,2	60,2	60,5	63,1
	Cana-Soca	$IC_{A/B}$	26,7	27,5	24,8	25,2	23,9	27,9	25,6	23,5	25,7
		$IC_{C/B}$	54,9	59,9	62,2	55,9	55,1	59,8	51,0	52,6	55,41
L100	Cana-Planta	$IC_{A/B}$	26,9	25,2	26,3	27,2	26,3	32,8	27,6	24,6	27,1
		$IC_{C/B}$	63,9	61,9	62,1	64,5	64,2	67,0	61,2	62,5	63,4
	Cana-Soca	$IC_{A/B}$	25,6	31,1	28,6	26,6	27,5	29,4	25,9	25,8	27,6
		$IC_{C/B}$	58,1	59,9	62,2	55,9	55,1	59,8	51,0	52,6	56,83
L75*	Cana-Planta	$IC_{A/B}$	25,0	28,5	27,7	27,7	23,4	32,2	27,2	24,5	27,1
		$IC_{C/B}$	61,5	60,2	63,2	65,5	60,8	67,8	58,0	61,4	62,3
	Cana-Soca	$IC_{A/B}$	23,0	25,5	26,0	26,1	25,3	29,3	18,8	23,8	25,1
		$IC_{C/B}$	47,0	51,6	56,8	51,1	50,6	60,1	38,1	48,1	50,41

$IC_{A/B}$ – Índice de Colheita para açúcar; $IC_{C/B}$ – Índice de Colheita para colmo; B – Biomassa Total da Parte Aérea e Colmo* (açúcar + bagaço seco)

4.8 Indicadores de Produtividade da Água

A produtividade da água é geralmente definida como sendo a relação entre o rendimento das culturas e a quantidade de água consumida para sua produção, e que é expressa em produção agrícola por unidade de volume de água (ALI; TALUKDER, 2008). De acordo com Cai e Rosegrant (2003), esse indicador é influenciado por diversos fatores, dentre eles destacam-se as diferenças varietais, as condições climáticas e ainda a tecnologia de irrigação e o manejo nela adotado, quando se trata, obviamente, de cultivos irrigados.

Os resultados apresentados na Tabela 28 mostram que os fatores Ciclo e Lâminas, quando analisados individualmente, não afetaram as variáveis de produtividade da água, sendo a influência destes observada apenas na biomassa seca total da parte aérea (BIOM). Entretanto, para o fator Variedades, verificou-se diferenças significativas para todas as variáveis, inclusive com interação desta com os outros fatores.

No tocante a variável BIOM, apesar desta não ser usualmente apresentada como um indicador de produtividade da cana-de-açúcar, a sua análise neste tópico é pertinente, tendo em vista que é a partir dela que será definida a produtividade da água para etanol de segunda geração (PAE2G). A apresentação dos resultados referentes a PAE2G e suas respectivas discussões serão objeto de um tópico exclusivo a ser comentado posteriormente.

Tabela 28 – Resumo da análise de variância para Produtividade da Água para Açúcar (PAA), Produtividade da Água para Etanol de 1ª Geração (PAE1G), Biomassa seca total da parte aérea (BIOM) e Produtividade da Água para Biomassa seca da parte aérea (PAB) de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca)

Fonte de Variação		PAA	PAE1G	BIOM	PAB
		F			
Parcela	Blocos (B)	2,485 ^{ns}	2,263 ^{ns}	5,960 ^{ns}	4,596 ^{ns}
	Ciclos (C)	1,803 ^{ns}	6,793 ^{ns}	0,202 ^{ns}	2,085 ^{ns}
Sub-parcela	Lâminas (L)	0,895 ^{ns}	1,285 ^{ns}	49,157 ^{**}	2,305 ^{ns}
	C x L	0,474 ^{ns}	0,638 ^{ns}	1,854 ^{ns}	1,221 ^{ns}
Sub-subparcela	Variedades (V)	6,179 ^{**}	6,403 ^{**}	18,982 ^{**}	0,613 ^{ns}
	C x V	2,755 ^{**}	2,479 [*]	20,778 ^{**}	1,454 ^{ns}
	L x V	2,096 [*]	1,980 [*]	1,448 [*]	1,753 [*]
	C x L x V	1,101 ^{ns}	1,135 ^{ns}	0,976 ^{ns}	1,469 ^{ns}
CV(%)	Parcela	34,88	35,15	16,87	21,82
	Sub-parcela	22,59	22,02	19,49	19,67
	Sub-subparcela	15,30	15,06	12,11	11,39
Média Geral		1,53	0,84	3,75	5,71

** – Significativo ao nível de probabilidade de 1%; * – Significativo ao nível de probabilidade de 5%; ns – não significativo; CV(%) – Coeficiente de Variação

4.8.1 Produtividade da Água para Açúcar (PAA)

O valor médio de produtividade da água para açúcar encontrado neste estudo foi igual a 1,53 kg m⁻³, que pode ser considerado alto quando se compara com os valores disponíveis na Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2015), que apresenta PAA variando entre 0,6 e 1,0 kg m⁻³. Entretanto, Steduto et al. (2012), citando trabalhos desenvolvidos por Thompson, (1976); Olivier e Singels, (2003); e Carr e Knox (2011), relatam faixa de valores oscilando entre 1,3 e 2,2 kg m⁻³. Provavelmente, as menores produtividades de água para açúcar divulgadas pela FAO, são resultado de condições diversas

de cultivo da cana, que incluem sistemas de irrigação pouco eficientes, manejo inadequado da irrigação, condições meteorológicas adversas, e ainda cultivos de sequeiro, conforme relatado por Cai e Rosegrant (2003).

Especificamente quanto aos sistemas de irrigação, estudos como os de Narayanamoorthy (2004) e Shrivastava et al. (2011) têm apontado que a produtividade da água em sistemas localizados costuma ser maior do que aquelas verificadas em outras modalidades de irrigação, por vezes, com incrementos superiores a 100%, conforme resultados obtidos por Molden et al. (2007) na região centro-oeste da Índia. No Brasil, não se sabe de trabalhos com PAA onde se tenha comparado rendimentos entre sistemas de irrigação distintos, entretanto, há resultados entre condições irrigadas e de sequeiro, com diferenças de PAA entre elas da ordem de 40% (SCARPARE et al., 2012).

No tocante as diferenças varietais identificadas no presente estudo, observou-se que a variedade V6 foi a que apresentou os maiores valores de PAA, com média igual a $1,76 \text{ kg m}^{-3}$. Esse destaque já era esperado, tendo em vista que este material foi o que apresentou os maiores rendimentos de açúcar e também os menores consumos de água. No entanto, as diferenças verificadas para este material não foram estatisticamente significativas.

Na análise da Figura 68, a qual apresenta a interação entre lâminas e variedades, nota-se que a variedade V6 se sobressaiu em todas as condições de disponibilidade hídrica testadas, o que evidencia a sua capacidade em utilizar mais eficientemente o recurso água. Resultados semelhantes para essa mesma cultivar também foram observados por Coelho et al. (2012) e Leal et al. (2015) quando avaliaram 24 variedades de cana-de-açúcar em ambiente protegido, sob duas condições de disponibilidade hídrica.

Além do destaque da variedade V6, outro material que também apresentou resultados satisfatórios foi a V2, para a qual observou-se os maiores valores de PAA na condição hídrico-restritiva de 75% da DHP. Esse comportamento em particular, permitiu que a hipótese testada nesta pesquisa fosse confirmada, tendo em vista que a produtividade de água para açúcar na condição de irrigação sob déficit foi estatisticamente igual ao da condição de irrigação plena. Esse resultado indica que, provavelmente, para as demais variedades estudadas, níveis de deplecionamento da água no solo menores do que os testados na condição de lâmina de 75% da DHP possam promover melhorias significativas na variável PAA.

Figura 68 – Médias dos dois ciclos de cultivo para valores de Produtividade da Água para Açúcar (PAA) para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Para as demais variedades, a V1, V2, V3 e V4 foram as que apresentaram valores intermediários de PAA, sendo eles iguais a 1,57; 1,56; 1,56 e 1,54 kg m⁻³, respectivamente. Com as menores produtividade e, portanto, as menos eficientes no uso da água, foram as variedades V5, V7 e V8, com PAA de 1,43; 1,41 e 1,39 kg m⁻³.

Andrade Júnior et al. (2012), estudando a variedade RB868515 no oeste do Piauí, sob diferentes condições de lâminas de irrigação e doses de N e K, encontraram valor médio de PAA igual a 1,34 kg m⁻³, sendo, portanto, similar aos verificados para a variedade V8. Entretanto, cabe ressaltar que a abordagem utilizada por estes autores é a que envolve o termo “pegada hídrica” (PH), que de acordo com Amarasinghe e Smakhtin (2014), nada mais é do que o inverso do termo produtividade da água.

4.8.2 Produtividade da Água para Etanol de 1º Geração (PAE1G)

Os dados referentes a produtividade da água para etanol dispensam análise estatística, tendo em vista que são provenientes da aplicação de uma constante aos valores da variável PAA para conversão em PAE1G. O valor da constante é igual a 0,56654 e esta representa o volume de álcool anidro obtido a partir de 1 quilograma de açúcar teórico recuperável (CONSECANA, 2006).

O valor médio da produtividade da água para etanol encontrado nesta pesquisa foi igual a 0,84 L m⁻³, o qual é duas vezes maior que a média mundial estimada para a cultura da cana-de-açúcar, que é de 0,40 L m⁻³ (CHIU et al., 2016). Para o Brasil, de acordo com estudos

desenvolvidos por Gerbens-Leenes e Hoekstra (2012), que estimaram a pegada hídrica das principais culturas açucareiras do mundo, os autores obtiveram PAE1G de $0,53 \text{ L m}^{-3}$ como valor médio para a cana-de-açúcar brasileira.

As diferenças observadas entre os valores encontrados na literatura e os obtidos no presente estudo, são bastante divergentes e podem ser atribuídas a condições diversas de cultivo da cana, como já mencionado anteriormente. Outra causa provável, pode estar associada à metodologia de estimativa da PAE1G utilizada pelos autores supracitados, que é obtida a partir da determinação da pegada hídrica em suas três diferentes componentes: a PH azul, PH verde e PH cinza, conforme metodologia desenvolvida por Hoekstra et al. (2011). Para fins de comparação, adotou-se como pegada hídrica a ser confrontada com os dados deste estudo, apenas a soma da PH verde e PH azul, as quais juntas, perfazem, o real consumo hídrico da cultura.

Resultados semelhantes aos observados neste estudo foram obtidos por Chico et al. (2015) na região leste do estado de Alagoas, quando estes estudaram a cana-de-açúcar submetida a nove regimes hídricos, durante três ciclos de cultivo. Os autores encontraram valores de PAE1G oscilando entre $0,61$ e $0,82 \text{ L m}^{-3}$, para a condição de sequeiro e irrigação plena, respectivamente. Entretanto, os valores de PAE1G obtidos por Andrade Júnior et al. (2012), também em pesquisa conduzida no nordeste brasileiro, foram mais modestos, com PAE1G de $0,41 \text{ L m}^{-3}$ para o cultivo de sequeiro e $0,73 \text{ L m}^{-3}$ para condições de irrigação plena, realizada com sistema de gotejamento subsuperficial.

No tocante às variedades, de forma análoga ao comportamento observado para a variável PAA abordada no tópico anterior, a cultivar V6 foi a que apresentou os maiores valores de PAE1G, com $0,97 \text{ L m}^{-3}$, não sendo observado efeito das lâminas de irrigação (Figura 69). Na sequência e em ordem decrescente de produtividade para etanol de 1ª geração, ficaram as variedades V2, V1, V4, V3, V7, V8 e V5, com $0,87$; $0,86$; $0,85$; $0,83$; $0,80$; $0,78$ e $0,77 \text{ L m}^{-3}$, respectivamente.

Figura 69 – Médias dos dois ciclos de cultivo para valores de Produtividade da Água para Etanol de 1ª Geração (PAE1G) para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

4.8.3 Biomassa seca total da parte aérea (BIOM)

A média da biomassa seca total da parte aérea obtida ao longo de todo período experimental foi igual a 3,75 kg por parcela, não sendo observada diferença estatística entre os dois ciclos de cultivo. No entanto, verificou-se efeito significativo dos tratamentos de lâminas de irrigação ($p < 0,01$), com o acúmulo de biomassa respondendo positivamente ao aumento de água disponibilizada às plantas.

Para o tratamento sem restrição hídrica, o rendimento de biomassa seca foi de 4,66 kg parcela⁻¹, sendo esse valor 24% superior ao da média experimental. Por outro lado, os rendimentos obtidos para o tratamento de irrigação mais restritivo (L50) foram substancialmente menores do que aqueles observados na condição potencial (L100), com a média para esta lâmina sendo igual a 2,81 kg parcela⁻¹. No tocante às lâminas de 75 e 75*, estas apresentaram diferença de 12% entre elas, com a L75 exibindo os maiores rendimentos. Conforme já observado anteriormente durante a análise de outras variáveis, as restrições hídricas graduais impostas às plantas submetidas ao tratamento L75*, especificamente durante a segunda metade dos ciclos de cultivo, provavelmente influenciaram negativamente os ganhos de biomassa para este tratamento.

Com relação às variedades, a V2 foi a que apresentou as maiores produtividades de BIOM, com média igual a 4,45 kg parcela⁻¹. Quando se extrapola os valores auferidos na

parcela para a unidade usual de avaliação de rendimento, nota-se que a produtividade alcançada por este material atingiu a marca de 85 t ha^{-1} (Figura 70), que de acordo com trabalhos realizados por Van Heerden et al. (2010) está bem próximo do rendimento potencial da cultura, que é de 88 t ha^{-1} . No entanto, Waclawovsky et al. (2010), citando trabalho desenvolvido por Irvine (1983), apresentam em seu estudo sobre produção de bioenergia a partir da cana-de-açúcar, rendimento máximo experimental de 98 t ha^{-1} .

Para as demais variedades, observou-se que a V1, V3 e V4, formaram o segundo grupo de produção de BIOM, dos quatro que foram criados a partir da categorização do teste de média de Scott-Knott, essas cultivares apresentaram rendimentos de 4,0; 4,0 e 3,97 kg parcela⁻¹, respectivamente. A variedade V5, que formou sozinha o terceiro grupo, e as variedades V8, V7 e V6, que compuseram o quarto e último grupo, apresentaram rendimentos na parcela iguais a 3,65; 3,40; 3,31 e 3,33 kg parcela⁻¹, respectivamente.

Figura 70 – Valores de biomassa seca total da parte aérea (BIOM) para as 8 variedades de cana-de-açúcar sob quatro condições de disponibilidade hídrica no solo durante os ciclos da cana-planta e cana-soca

A Figura 71 apresenta o desdobramento da interação entre os fatores lâminas e variedades. Nesta forma de análise, é notório o destaque da variedade V2 frente as demais,

não apenas na comparação da média varietal, mas também, em função da resposta produtiva deste material quando submetido a condições hídrico-restritivas. Este mesmo comportamento já havia sido verificado durante a análise das variáveis TCH e RBA, e podem configurar importantes critérios na tomada de decisão quanto a escolha da variedade a ser plantada.

Figura 71 – Médias dos dois ciclos de cultivo para valores de biomassa seca total da parte aérea (BIOM) para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

De modo geral, verificou-se que a prática da irrigação, independentemente da lâmina avaliada, aumentou de maneira considerável o rendimento de BIOM para todas as variedades, tendo em vista que a média de biomassa seca total de cultivos comerciais é de 39 t ha⁻¹ (WACLAWOVSKY et al., 2010). Esses resultados evidenciam o potencial produtivo da cana-de-açúcar em resposta a condições satisfatórias de disponibilidade hídrica.

Conforme verificado em itens anteriores, os ganhos de biomassa por unidade de área parece ser a única forma de aumentar os rendimentos de açúcar e álcool, tendo em vista que há evidências de que o limite fisiológico para ganhos a partir do índice de colheita já foi alcançado. Dessa forma, os incrementos nos rendimentos de biomassa total, favoreceriam não apenas o aumento na produtividade de açúcar e álcool de 1ª geração, mas também de palha ou biomassa residual, que poderia ser utilizada no processo de cogeração e ainda, na produção de etanol de 2ª geração, quando a tecnologia para esta ganhar escala comercial.

4.8.4 Produtividade da água para biomassa (PAB)

De acordo com Steduto et al. (2007a), a produtividade da água para biomassa pode ser definida como a relação entre a produção de biomassa seca da parte área (g ou kg), por unidade de área (m^2 ou ha), por unidade de volume de água consumida (mm ou m^3), sendo normalmente expressa em kg m^{-3} ou $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Dessa forma, quanto maior for a PAB, mais eficiente será a cultura no uso da água.

O valor médio da produtividade da água para biomassa em todo período experimental foi igual a $5,71 \text{ kg m}^{-3}$, não sendo verificado efeito isolado de nenhum dos fatores estudados. Quanto aos fatores combinados, verificou-se interação entre lâminas e variedades, com as cultivares V1, V2 e V8 apresentando comportamento diferenciado para as lâminas de irrigação estudadas, conforme é mostrado na Figura 72.

Resultados semelhantes foram encontrados por Barbosa (2015), quando estudava os efeitos de diferentes intensidades de déficit hídrico sobre a maturação, e as implicações destas em variáveis de rendimento e qualidade da cana, durante o primeiro ciclo de cultivo deste mesmo experimento. Nesta abordagem, Barbosa (2015) determinou a produtividade da água normalizada para biomassa, e verificou que as variedades V1, V2 e V8, foram as que apresentaram as maiores PAB; contudo, naquela oportunidade, não foi verificada diferença estatística para o fator lâmina. Acredita-se que os tratamentos de maturação estudados por aquele autor, os quais não foram objetos de investigação nesta pesquisa, possam ter promovido uma maior variabilidade dos dados no experimento de Barbosa (2015), que por sua vez não permitiu que o teste estatístico identificasse diferença significativa.

Para o presente estudo, observou-se influência das condições de disponibilidade hídrica sobre a PAB, o que é um indicativo da existência de cultivares mais eficientes do que outras no uso do recurso água. Entretanto, de acordo com Steduto et al. (2007a), a faixa de variação da PAB entre genótipos é relativamente estreita, e que a melhoria nesta variável só poderia vir de descobertas genéticas que pudessem alterar a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar. Os autores ainda relatam que tais descobertas são extremamente difíceis de se alcançar, e que caso elas ocorram, o tempo para obtê-las seria demasiadamente longo, uma vez que a evolução natural da espécie, aparentemente, já desenvolveu mecanismos de adaptação otimizados para a utilização dos recursos.

Figura 72 – Médias dos ciclos de cultivo para valores de Produtividade da Água para Biomassa (PAB) para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

4.8.5 Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração (PAE2G)

A produtividade da água para etanol de 2ª geração obtida neste estudo foi estimada para condições potenciais, as quais envolvem não apenas a conversão da componente celulose, mas também dos açúcares de cinco carbonos (pentoses) que formam a fração hemicelulose. Os termos adotados para caracterizá-los foram o $PAE2G_{CELULOSE}$ e $PAE2G_{HEMICELULOSE}$, os quais representam a Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração a partir da fração celulose e a Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração a partir da fração hemicelulose, respectivamente.

Adicionalmente aos termos $PAE2G_{CELULOSE}$ e $PAE2G_{HEMICELULOSE}$, foi adotada também a expressão PAE_{TOTAL} , a qual representa a eficiência no uso da água para obtenção do rendimento potencial de etanol, passível de ser alcançado a partir do aproveitamento integral da planta de cana-de-açúcar; esta última variável representa a soma dos termos $PAE2G_{CELULOSE}$, $PAE2G_{HEMICELULOSE}$ e ainda a $PAE1G$.

Os resultados da análise de variância para as variáveis: produtividade da água para etanol de 2ª geração a partir da fração celulose ($PAE2G_{CELULOSE}$), produtividade da água para etanol de 2ª geração a partir da fração hemicelulose ($PAE2G_{HEMICELULOSE}$) e produtividade da água para etanol total (PAE_{TOTAL}) estão sumarizados na Tabela 29.

Tabela 29 – Resumo da análise de variância para Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração para a fração celulose (PAE2G_{CELULOSE}), Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração para a fração hemicelulose (PAE2G_{HEMICELULOSE}), Produtividade da Água para Etanol Total (PAE_{TOTAL}) de oito cultivares de cana-de-açúcar, conduzidas sobre diferentes condições de disponibilidade de água no solo, durante os dois ciclos de cultivo (cana-planta e cana-soca).

Fonte de Variação		Produtividade da Água para Etanol Combustível		
		PAE2G _{CELULOSE}	PAE2G _{HEMICELULOSE}	PAE _{TOTAL}
		F		
Parcela	Blocos (B)	7,098 ^{ns}	7,098 ^{ns}	7,388 ^{ns}
	Ciclos (C)	14,793 ^{ns}	14,793 ^{ns}	0,003 ^{ns}
Sub-parcela	Lâminas (L)	1,186 ^{ns}	1,186 ^{ns}	1,249 ^{ns}
	C x L	3,558*	3,558*	2,386 ^{ns}
Sub-subparcela	Variedades (V)	7,234**	7,234**	2,439*
	C x V	2,556*	2,556*	3,192**
	L x V	1,275 ^{ns}	1,275 ^{ns}	1,928*
	C x L x V	0,775 ^{ns}	0,775 ^{ns}	1,046 ^{ns}
CV(%)	Parcela	21,26	21,26	19,56
	Sub-parcela	23,55	23,55	19,33
	Sub-subparcela	12,48	12,48	11,60
Média Geral		0,61	0,36	1,81

** – Significativo ao nível de probabilidade de 1%; * – Significativo ao nível de probabilidade de 5%; ns – não significativo; CV(%) – Coeficiente de Variação

As médias de produtividade da água para as variáveis PAE2G_{CELULOSE} e PAE2G_{HEMICELULOSE}, foram iguais a 0,61 e 0,36 L m⁻³, respectivamente, tendo sido observada diferenciação estatística (p<0,01) apenas para o fator Variedades, na análise dos fatores isolados (Figura 73).

Dentre as oito variedades estudadas, as maiores produtividades foram observadas nas variedades V7, V2 e V1, as quais ficaram com valores de PAE2G_{CELULOSE} e PAE2G_{HEMICELULOSE} iguais a 0,66; 0,65; 0,63 e 0,39; 0,39; 0,37, respectivamente. As variedades V4, V8, V5 e V3 foram as que apresentaram valores de PAE2G intermediários, com rendimentos iguais a 0,60; 0,60; 0,60 e 0,58 para PAE2G_{CELULOSE} e 0,36; 0,36; 0,35 e 0,34 para PAE2G_{HEMICELULOSE}. Quanto ao terceiro grupo, a variedade V6 foi o seu representante, exibindo as menores eficiências no uso da água para as variáveis PAE2G_{CELULOSE} e PAE2G_{HEMICELULOSE}, com valores iguais a 0,53 e 0,31, respectivamente.

De forma análoga aos comentários dispensados para a variável PAB, as diferenças varietais observadas para a PAE2G_{CELULOSE} e PAE2G_{HEMICELULOSE} foram pouco expressivas e praticamente independentes da variação do conteúdo de água no solo. Entretanto, vale ressaltar que para as condições deste estudo, assumiu-se que os teores de celulose e hemicelulose são idênticos, quando na verdade existe algum grau de variabilidade entre estes, conforme foi verificado por Ogata (2013), quando realizou a caracterização lignocelulósica de 207 genótipos de cana-de-açúcar e, também por Pereira et al. (2015) quando estudavam a produção de etanol de 2ª geração a partir de biomassa lignocelulósica da cana. Desta forma, as

diferenças existentes nos teores de holocelulose das variedades podem promover incrementos ou reduções significativas na produtividade da água para etanol de 2ª geração, devendo estas ser quantificadas em trabalhos futuros, tendo em vista o grande potencial de incremento no rendimento de etanol a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar.

Figura 73 – Produtividade da Água para Etanol de 2ª Geração (PAE2G) a partir das frações celulose e hemicelulose, obtidas de 8 variedades de cana-de-açúcar submetidas a quatro condições de disponibilidade hídrica, nos ciclos da cana-planta e cana-soca.

Com relação à produtividade da água para etanol total (PAE_{TOTAL}), notou-se que houve efeito combinado dos fatores lâmina e variedades ($p < 0,05$), com média para essa variável igual a $1,81 \text{ L m}^{-3}$. As variedades V1 e V2 foram as que mais se destacaram, com rendimentos médios iguais a $1,90$ e $1,86 \text{ L m}^{-3}$, respectivamente, conforme pode ser observado na Figura 74.

Figura 74 – Médias dos ciclos de cultivo para a Produtividade da Água para Etanol Total (PAE_{TOTAL}) para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

5 CONCLUSÕES

Considerando as condições em que o presente estudo foi desenvolvido e com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) A hipótese de que existe uma estratégia de irrigação sob déficit para a cana-de-açúcar, em que os rendimentos auferidos nesta condição sejam similares ao obtidos em condições de irrigação plena, foi comprovada;
- b) A área foliar respondeu positivamente a maior disponibilidade hídrica no solo, tendo sido verificado uma relação proporcional entre estas variáveis. Observou-se variação nos valores de área foliar total da parcela entre 0,81 e 4,23 m², sendo estes valores verificados no primeiro e último corte, respectivamente (ciclo da cana-soca);
- c) Houve incremento de biomassa seca total da parte aérea (BTPA) a medida em que se aumentou o volume de água disponibilizado às variedades, os valores médios observados para as lâminas de irrigação foram iguais a 4454, 6321, 7394 e 5646 g m⁻² para os tratamentos L50, L75, L100 e L75*, respectivamente. Quanto às variedades, verificou-se que a V2 foi a mais produtiva com valor médio de BTPA de 7062 g m⁻², valor esse superior em 38% ao apresentado pela variedade V6, que foi a menos produtiva;
- d) Nos primeiros 100 dias de cultivo a matéria seca alojou-se, preferencialmente, nas folhas, e a medida em que a planta se desenvolveu o dreno principal passou a ser os colmos, o qual apresentou ao final dos ciclos, proporção média da BTPA igual a 0,53;
- e) O rendimento de colmos aumentou de forma proporcional ao volume de água disponibilizado às plantas, com o tratamento L100 apresentando as maiores produções, média de 208 t ha⁻¹, e o L50 as menores (119 t ha⁻¹). As variedades V2 e V4 foram as que apresentaram os maiores rendimentos, com valores iguais a 235,5; 203,5 e 171,0 t ha⁻¹, para as lâminas de 100%, 75% e L75*, respectivamente.
- f) O valor médio para a variável rendimento bruto de açúcar foi de 17,79 t ha⁻¹ para todo período experimental, não tendo sido verificado diferenciação entre ciclos.

Para às lâminas de irrigação, as diferenças de rendimento entre a condição sem restrição hídrica e o ambiente mais restritivo alcançou $9,42 \text{ t ha}^{-1}$;

- g) A produtividade da água para açúcar, bem como os demais índices de produtividade da água, apresentou diferenças significativas para o fator lâmina, o que indica a existência de cultivares de cana-de-açúcar mais eficientes no uso da água;
- h) A produtividade da água para etanol total ($\text{PAE}_{\text{TOTAL}}$) apresentou valores expressivos, com média para essa variável igual a $1,81 \text{ L m}^{-3}$, o que evidencia o rendimento potencial de etanol (1G + 2G) a partir da cana-de-açúcar quando é adotado o aproveitamento integral das plantas.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, R.R.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 42-55.
- ALI M.H, TALUKDER, M.S.U. Increasing water productivity in crop production – A synthesis. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 95, p.1201-1213, 2008.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 299 p. (FAO Irrigation and drainage Paper, 56).
- ALMEIDA, A.C.S.; SOUZA, J.L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G.V.S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R.A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.
- ALMEIDA, L.M. **Seleção de famílias de irmãos-completos de cana-de-açúcar e estimativa da diversidade genética na via marcador de DNA (ISSR)**. 2010. 83p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2010.
- AMARASINGHE, U.A.; SMAKHTIN, V. Water productivity and water footprint: misguided concepts or useful tools in water management and policy? **Water International**, Colombo, v. 39, n. 7, p. 1000-1017, 2014.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; AGUIAR NETTO, A.O.; BRAGA, D.L.; SILVA, M.E.; NOLETO, D.H. Agricultural water footprint of ethanol and sugar from sugar cane under fertigation production system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 2012, Valencia. **Anais...** Kyoto: CIGR, 2012. 1 CD-ROM.
- ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba, 2002. 272p.
- ANZILIERO, D.; ALCÂNTARA NETO, F. Análises morfofisiológicas de cinco genótipos de cana-de-açúcar, em cana planta, no município de União-PI. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 23., 2014, Teresina. **Anais...** Teresina: UFPI, 2014. 3p.
- AUDE, M.I.S. Estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e suas relações com a produtividade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 241-248, 1993.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: PLANALSUCAR, CORDENADORIA REGIONAL SUL. COSUL. Araras. 1977. p. 1-22.
- BARBOSA, F. S. **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. 2015. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

- BARNES, A.C. **The sugarcane**. 2nd ed. London: Leonard Hill Books, 1974. 572p.
- BEAUCLAIR, E.G.F.; SCARPARI, M.S. Noções Fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. Piracicaba: Livrocere, 2006. p. 80-91.
- BECKMANN, M.Z.; DUARTE, G.R.B.; PAULA, V.A.; MENDEZ, M.E.G.; PEIL, R.M.N. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 86-92, 2006.
- BENDA, G.T.A. Numbering sugarcane leaves and shoots. **Sugarcane Pathology Newsletter**, Baton Rouge, n. 3 p. 16-18, 1969.
- BEZUIDENHOUT, C.N.; O'LEARY, G.J.; SINGELS, A.; BAJIC, V.B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**. Amsterdam, v.76, n.2, p. 589-599, 2003.
- BINOD, P.; SINDHU, R.; SING HANIA, R R.; VIKRAM, S.; DEVI, L.; NAGALAKSHMI, S.; KURIEN, N.; SUKUMARAN, R.K.; PANDEY, A. Bioethanol production from rice straw: An overview. **Bioresource Technology**, Oxon, v. 101, n. 13, p. 4767-4774, 2010.
- BLACKBURN. Determination of true chloride content of biological fluids and tissues Sugarcane. Analysis of simple non-isotopic methods. London, **Analytical Chemistry**, New York, v. 35, p. 101-105, 1984.
- BLANCO, F.F. **Manual de construção e utilização de extratores de cápsula porosa para obtenção da solução do solo**. Teresina: EMBRAPA Meio Norte, 2006. 36 p. (Documentos, 142).
- BOS, M.G.; MURRAY-RUST, D.H.; MERREY, D.J.; JOHNSON, H.G.; SNELLEN, W.B. Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. **Irrigation and Drainage Systems**, New York, v. 7, n. 4, p. 231-261, 1994.
- BOX, G.E.P. Non-normality and tests on variance. **Biometrika**, London, v. 40, n. 4, p. 318-335, 1953.
- BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, London, v. 26, n. 2, p. 211-252, 1964.
- BRIEGER, F.O. Início da safra. Como determinar a maturação. **Boletim Informativo Copereste**, Ribeirão Preto, v. 4, n. único, p. 1-3, 1968.
- BURIOL, G.A.; STRECK, N.A.; PETRY, C.; SCHNEIDER, F.M. Transmissividade da radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 1-4, 1995.
- CAI, X.; ROSEGRANT, M.W. World Water Productivity: Current situation and future options. In: KIJNE, J.W.; BARKER, R.; MOLDEN, D. **Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement**. CAB International, 368p. 2003.

CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. **Produção da cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 31-64.

CAMARGO, A.P. **Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais**. 2012. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CARDOZO, N.P. **Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas**. 2012. 201 p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

CARMO, J.F.A. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial no submédio do Vale São Francisco**. 2013. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2013.

CARR, M.K.V.; KNOX, J.W. The water relations and irrigations requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): a review. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 47, n. 1, p. 1-25, 2011.

CARVALHO, C.M.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C.H.A.; SILVA, C.T.S.; GOMES FILHO, R.R. Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Agrária**, Recife, v. 4, n. 1, p. 72-77, 2009.

CASTILO, F.E.; SENTIS, F.C. **Agrometeorologia**. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2001. 517p.

CASTRO, P.R.C. Aplicações da fisiologia vegetal no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FISILOGIA DA CANA-DE-AÇÚCAR, 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: STAB, 2000, p. 1-9.

CASTRO, P.R.C.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Fisiologia da cana-de-açúcar. In: MENDONÇA, A.F. (Org.). **Cigarrinhas da cana-de-açúcar**. Maceió: Insecta, 2005. v. 1, p. 3-45.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. **Ecofisiologia de culturas extrativas**: cana-de-açúcar, seringueira, coqueiro, dendezeiro e oliveira. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 2001. 138p.

CHAUDHRY, F.H.; LEME, E.J.A. Optimal irrigation scheduling of sugarcane by net profit maximization through dynamic programming. In: eds. CAMP, C.R.; SADLER, E.J.; YODER, R.E. **Proceedings of the International conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling**. St. Joseph: ASAE, 1996. p. 1122-1128.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H.M.C.; ARRUDA, R.; BESPALHOK FILHO, J.C.; BURNQUIST, W.L.; CRESTE, S.; Di CIERO, L.; LANDELL, M.G.A. MATSUOKA, S. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, Rockville, v. 4, n. 1, p. 62-89, 2011.

CHICO, D.; SANTIAGO, A.G.; GARRIDO, A. Increasing efficiency in ethanol production: Water footprint and economic productivity of sugarcane ethanol under nine different water regimes in north-eastern Brazil. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v.13, n.2, p. 1-10, 2015.

CHIU, C.C.; SHIANG, W.J.; LIN, C.J. The Water Footprint of Bioethanol. **Journal of Clean Energy Technologies**, Singapura, v. 4, n. 1, p. 43-47, 2016.

CHOVAU, S.; DEGRAUWE, D.; BRUGGEN, B. Critical analysis of techno-economic estimates for the production cost of lignocellulosic bio-ethanol. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. New York, v. 26, p. 307-321, 2013.

COELHO, R.D.; MASCHIO, R.; LEAL, D.P.V.; BARBOSA, F.S.; MAURI, R. Water Productivity into Biomass and Energy for 24 Brazilian Sugarcane Varieties Under Drip Irrigation. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2012. Dallas, **Proceedings...** Dallas: ASABE, 2012. p. 1-18.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: terceiro levantamento**. Brasília, 2015. p. 70. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de Instruções**. 5. ed. Piracicaba, 2006. 112 p.

DAL PAI, E. **Radiações e Frações Solares UV, PAR e IV em Estufa de Polietileno: Evolução Anual Média Mensal Diária e Equações de Estimativa**. 2010. 69p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 29-34, 2002.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L.; GARCIA, C.J.B.; DUENHAS, L.H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2008.

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution. In. HEINZ, D.J. (Ed.) **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 7-84.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H. de A.; AZEVEDO, H.M. de; AZEVEDO, C.A.V. de. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.

DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil: In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4, 1988, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Copersucar, 1988. p.33-40.

De WIT, C.T. **Transpiration and crop yields**. Verson I. Landbouwk. Onderz. 64.6. Wageningen: Inst. Biol. Chem Res. on Field Crops and Herbage, 1958. 88 p.

DIAS, N.D.; BLANCO, F.F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H.R.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F. **Manejo da salinidade na agricultura**: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2010. p. 129-140.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORPEM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar**: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. Viçosa: Editora UFV, 2012. p. 25-49.

DONALD, C.M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereal as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, Madison, v. 28 p. 361-405, 1976.

DOOREMBOS, J.; KASSAN, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 197p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGRPECUÁRIA. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2723697/biodiesel-reduz-em-70-a-emissao-de-gases-do-efeito-estufa>>. Acesso em: 27 out. 2014.

ENGLISH, M. Deficit irrigation. I. Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 116, n. 3, p. 399-412, 1990.

ESTATCAMP®. **Portal action**: software action. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/content/sobre-o-action>>. Acesso em: 13 fev. 2015.

EVELSEN, C.I.; MUCHOW, R.C.; EL-SWAIFY, S.A.; OSGOOD, R.V. Yield accumulation in irrigated sugarcane: I. Effect of crop age and cultivar. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 4, p. 638-646, 1997.

FARIAS, C.H.A. **Desempenho morfofisiológico da cana-de-açúcar em regime irrigado e de sequeiro na Zona da Mata Paraibana**. 2001. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2001.

FARIAS, C.H.A.; DANTAS NETO, J.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R. Índice de área foliar em cana-de-açúcar sob diferentes níveis de irrigação e zinco na Paraíba. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 45-55, 2007.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J. Índice de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FARIAS, J.R.B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S.R. Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 17-22, 1994.

FARIA, L.A. **Proposta de norma técnica de ensaio para tubogotejadores de irrigação: resistência ao entupimento por particulados sólidos em suspensão**. 2013. 129p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2003. 240p.

FERRAZ, A.; MENDONÇA, R.; SILVA, F.T. Organosolv delignification of white-and brown-rotted *Eucalyptus grandis* hardwood. **Chemical Technology and Biotechnology**. Hoboken, v. 75, n. 1, p. 18-24, 2000.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. Disponível em: <<http://www.dex.ufla.br/~danielff/softwares.htm>>. Acesso em: 19 mai. 2015.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA, J.L.; ESCOBEDO, J.F.; TEODORO, I.; LYRA, G.B.; ARAÚJO NETO, R.A. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n. 8, p. 1415-4366, 2014.

FOLEGATTI, M.V. SCATOLINI, M.E.; PAZ, V.P.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J.A. Efeitos da cobertura plástica sobre os elementos meteorológicos e evapotranspiração da cultura do crisântemo em estufa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 155-163, 1997.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATION – FAO. Crop Water Information: Sugarcane. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html> Acesso em: 06 nov. 2015.

FRANCO, H.C.J.; MAGALHÃES, P.S.G.; CAVALETT, O.; CARDOSO, T.F.; BRAUNBECK, O.A.; BONOMI, A. How much trash to removal from sugarcane field to produce bioenergy. BRAZILIAN BIOENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY CONFERENCE, 1., Campos do Jordão. **Anais...** Ribeirão Preto: BBEST, 2011. 1 CD-ROM.

FRISINA, V.A.; GOMES, E.N.; PASQUAL, P.H.; ESCOBEDO, J.F. Equações de estimativa sazonal e anual da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) com partição diária e horária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11.; REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2., 1999, Florianópolis: CBA, 1999. 1 CD-ROM.

FRIZZONE, J.A. Eficiência e uniformidade da irrigação: possibilidades técnicas e econômicas para melhoria. In: FRIZZONE, J.A.; LIMA, S.C.R.V.; COSTA, R.N.T. **Irrigação: da conservação de água e solo à sustentabilidade com vistas à autogestão**. Fortaleza, CE. Inovagri, 2014. 129p.

FRIZZONE, J.A.; MATIOLI, C.S.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A.C.A. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar para a região do norte do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.

GASCHO, G.J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I D; PEET, M.M. **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GAVA, G.J.C.; SILVA, M.A.; SILVA, R.C.; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KOLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 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 ou não com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 1347-1354, 2001.

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 9, p. 1275-1284, 2009.

GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A.Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol, **Environmental International**, Amsterdam, v. 40, p. 202-211, 2012.

GIRIO, F.M.; FONSECA, C.; CARVALHEIRO, F.; DUARTE, L.C.; MARQUES S.; BOGEL-LUKASIK, R. Hemicelluloses for fuel ethanol: A review. **Bioresource Technology**, Oxon, v. 101, n. 13, p. 4775-4800, 2010.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Chattanooga, v.36, p. 2086-2097, 2008.

GOLDEN, L.E. Nutrient uptake by sugarcane in Louisiana. **The sugar Journal**, London, v. 23, n. 11, p. 22-24, 1961.

GOMES, M.M.A.; LAGÔA, A.M.M.A.; MEDINA, C.L.; MACHADO, E.C.; MACHADO, M.A. Interactions between leaf water potential, stomatal conductance and abscisic acid content of orange trees submitted to drought stress. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 16, n. 3, p. 155-161, 2004.

GUZZELLI, M.N.A.; PAES, L.D.A. Irrigação de cana-de-açúcar comercial. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7. 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Copersucar, 1997. 1 p.

GUERZONI, J.T.S. **Avaliação da tolerância ao estresse salino de plantas de cana-de-açúcar transformadas com o gene P5CS**. 2010. 74p. Dissertação (Mestrado em Genética e Biologia Molecular) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010.

GUISELINI, C.; SENTELHAS, P.C.; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Manejo da cobertura de ambientes protegidos: radiação solar e seus efeitos na produção da gébera. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 645-652, 2010.

HAY, R.K.M. Harvest index: A review of its use in plant breeding and crop physiology. **Annals of Applied Biology**, Cambridge, v. 126, n. 1, p. 197-216, 1995.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil - STAB**, v. 17, p. 32-34, 1999.

HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K.; ALDAYA, M.M.; MEKONNEM, M.M. **The water footprint assessment manual: Setting the global standard**. London: Earthscan, 2011 228p.

HOLANDA, L.A. **Resposta varietal da cana-de-açúcar à deficiência hídrica, durante o desenvolvimento inicial em um latossolo vermelho distroférrico**. 2012. 66p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W.; PACE, R.; SPILLMAN, M.F. Boosting yield with limited irrigation water. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, Townsville, v. 21, p. 203-211, 1999.

INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J. Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 71-84, 2002.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 3, p. 185-202, 2005.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, R.C.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modeling sugar cane production systems I. Development and performance of the sugar cane module. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 253-271, 1999.

KINGSTON, G. Benchmarking yield of sugarcane from estimates of water use. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 16, p. 201-209, 1994.

LEAL, D.P.V. **Evapotranspiração da cana-de-açúcar e fotossíntese acumulada em biomassa e energia, para diferentes variedades, disponibilidades hídricas no solo e ciclos de cultivos**. 2012. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

LEAL, D.P.V.; BARBOSA, F.S.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; COELHO, R.D.; MASCHIO, R.; SANTOS, L.C. Water Productivity into sugar and biomass for sugarcane. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3., Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2015. 1 CD-ROM.

LEME, E.J.A.; MANIERO, M.A.; GUIDOLIN, J.C. Estimativa da área foliar da cana-de-açúcar e sua relação com a produtividade. **Caderno PLANALSUCAR**. Piracicaba, v. 2, p. 3-22, 1984.

LEVIDOW, L.; ZACCARIA, D.; MAIA, R.; VIVAS, E.; TODOROVIC, M.; SCARDIGNO, A. Improving water-efficiency irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 146, p. 84-94, 2014.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, J.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.

MACHADO JÚNIOR, G.R. Sugarcane varieties. **Sugar Journal**, News Orleans, v. 66, n. 2, p. 6-7, 2002.

MACHADO, T.; NEVES, M.F.; NETO, S.B – Viabilidade Econômica da Irrigação Localizada na Cultura da Cana-de-Açúcar - CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 40., 2002, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: SOBER, 2002. 1 CD-ROM.

MANCINI, M.C. **Mapeamento genético e identificação de marcadores AFLP, microssatélites genômicos e funcionais associados a parâmetros agroindustriais em cana-de-açúcar**. 2010. 98p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Genética e melhoramento de plantas) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010.

MANTOVANI, E.C. **Avalia**: manual do usuário. Viçosa: DEA/UFV–PNP&D/café Embrapa, 2002.

MARAFON, A.C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 29p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 168).

MARCELIS, L.F.M. Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 406, p. 2261-2268, 2004.

MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. p. 111-130.

MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JÚNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar**. Produção e industrialização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: Funep, 2001. 166p.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) ciclo cana soca**: um modelo de análise de decisão para o Estado de São Paulo. 1998. 98p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Piracicaba, 1998.

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J.A.; MACCHERONI, W.; FOUTO, I. Bioenergia da Cana. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar**: Bioenergia, Açúcar e Álcool. 2 ed. Viçosa: UFV, 2012. p. 487-517.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A.A.F; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, 1999. p. 205-252.

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

McCORMICK, A.J.; WATT, D.A.; CRAMER, M.D. Supply and demand: sink regulation of sugar accumulation in sugarcane. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, n. 2, p. 357-364, 2009.

MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation**: a guide for management. Logan: Utah State University, 1978. 221p.

MILLER, J.D.; GILBERT, R.A. **Sugarcane Botany**: A Brief View. University of Florida IFAS extension. 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 17 out. 2015.

MOLDEN, D.; OWEIS, T.Y.; STEDUTO, P.; KIJNE, J.W.; HANJRA, M.A.; BINDRABAN, P.S. Pathways for increasing agricultural water productivity. In: MOLDEN, D. **Water for food, water for life**: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London, UK, 2007. p. 279-310.

MOLDEN, D.; OWEIS, T.; STEDUTO, P.; BINDRABAN, P.; HANJRA, M.A. KIJNE, J. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 4, p. 528-535, 2010.

MOLDEN, D.J.; SAKTHIVADIVEL, R.; PERRY, C.J.; FRAITURE, C.; KLOEZEN, W.H. **Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems**. Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 1998. 34p.

MONTEIRO, M.A.R.; CRUZ, J.C.; OLIVEIRA, A.C.; DURAES, F.O.M. Índice de Colheita: Um forte conceito fisiológico de uso inadequado para seleção de cultivares de milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 22., 1998, Recife. **Anais...** Sete Lagoas: CNMS, 1998. v. 1. 1 CD-ROM.

MORAIS, K.P.; MEDEIROS, P.S.L.; SILVA, S.D.A.; BIONDO, J.; BOELTER, J.H.; DIAS, F.S. Maturação de genótipos de cana-de-açúcar no município de Jaguari-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. **Anais...** Campinas: CBA, 2011. 1 CD-ROM.

MOURA, L.C.; SILVA, N.F.; CUNHA, F.N.; BASTOS, F.J.C.; CÉLIA, J.A.; TEIXEIRA, M.B. Índice de maturação da cana-de-açúcar fertirrigada sobre diferentes lâminas. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n.1, p. 64-76, 2014.

MPUSIA, P.T.O. **Comparison of Water Consumption between Greenhouse and Outdoor Cultivation**. 2006. 86 p. Thesis (Master of Science in Geo Information Science and Earth observation) - International Institute For Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, 2006.

MUCHOW, R.C.; CARBERRY, P.S. Environmental control of phenology and leaf growth in tropically adapted maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 20, n. 3, p. 221-236, 1989.

NARAYANAMOORTHY, A. Impact Assessment of Drip Irrigation in India: The Case of Sugarcane. **Development Policy Review**, London, v. 22, n. 4, p. 443-462, 2004.

NEVES, J.L.M.; MAGALHÃES, P.S.G.; OTA, W.A. Sistema de monitoramento de perdas visíveis de cana-de-açúcar em colhedora de cana picada. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 764-770, 2004.

NEVES, L.C.G.; PINTO L.E.V.; MARQUES, T.A.; BENINCASA, F.; SEDANO, M.V.; RAMPAZO, E.M. Maturação em cana-de-açúcar. Manejo do solo. **Revista Científica da unoeeste**, Colloquium Agrariae. Presidente Prudente, v. 6, n. 2, p. 14-19, 2010.

NEVES, M.F.; TRAMBIN, V.G; CONSOLI, M. **Mapeamento e quantificação do setor sucroenergético 2008**. Ribeirão Preto: MARKESTRAT/FUNDACE/UNICA, 2009. p. 36.

OGATA, B.H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. 2013. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2013.

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 Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C.; SIMÕES NETO, D.E.; 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, 2011.

OLIVEIRA, E.L.; ANDRADE, L.A.B.; FARIA, M.A.; EVANGELISTA, A.W.P.; MORAIS, A.R. Uso da vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 11, p. 1398 -1403, 2009.

OLIVEIRA, R.A.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; BESPALHOK-FILHO, J.C.; ZUFFELATO-RIBAS, K.C.; SILVA, D.K.T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.

OLIVIER, F.C.; DONALDSON, R.A.; SINGELS, A. Drying off sugarcane on soils with low water holding capacity. **Proceedings Annual Congress of the South African Sugar Technologists Association**, Durban, v. 80, p. 18-20, 2006.

PECIULYTE, A.; KARLSTRÖM, K.; LARSSON, P.T.; OLSSON, L. Impact of the supramolecular structure of cellulose on the efficiency of enzymatic hydrolysis. **Biotechnology for Biofuels**, London, v. 8, n. 56, p. 1-13, 2015.

PENE, C.B.G.; EDI, G.K. Sugarcane yield response to deficit irrigation at two growth stages. In: KIRDA, C.; MOUTONNET, P.; HERA, C.; NIELSEN, D.R. **Crop Yield Response to Deficit Irrigation**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. p. 136-147.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de vegetais**. Campinas. Instituto Agrônomo. Campinas, 1987. 33 p. (IAC-Boletim Técnico n. 114).

PEREIRA, L.S.; OEWIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.57, n. 3, p.175-206, 2002.

PEREIRA, L.S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 108, p. 39-51, 2012.

PEREIRA, S.C.; MAEHARA, L.; MACHADO, C.M.M.; FARINAS, C.S. 2G ethanol from the whole sugarcane lignocellulosic biomass. **Biotechnology for Biofuels**, London, v. 44, n. 8, p. 1-16, 2015.

PERES, F.C. **Determinação dos coeficientes de cultura (Kc) da cana-de-açúcar**: ciclo de cana soca. 1988. 94p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PERRY, C.J. **Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems**. Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 1996. 112 p.

PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R.G.; BURT, C.M. Increasing productivity in irrigated agriculture: agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, n. 96, n. 11, p. 1517-1524, 2009.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477p.

PINCELLI, R.P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.

PIRES, R.C.M.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E. Irrigação e drenagem. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G. de A. **Cana-de-açúcar**, Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 631–670.

POORTER H.; GARNIER E. Ecological significance of inherent variation in relative growth rate and its components. In: **Handbook of functional Plant Ecology**, New York: Marcel Dekker, 1999. p. 81-120.

PORTES, M.T.; ALVES, T.H.; SOUZA, G.M. Water deficit affects photosynthetic induction in *Bauhinia forficata* Link (Fabaceae) and *Esenbeckia leiocarpa* Engl. (Rutaceae) growing in understorey and gap conditions. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 18, n. 4, p. 491-512, 2006.

PROCANA (BRASIL). Números do setor sucroenergético. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/sobre-nos/>>. Acesso em: 11 mai. 2015.

RAGAB, R. A note on water use efficiency and water productivity. Water4Crops. 2014. 11p. Disponível em: <http://www.water4crops.org/wp-content/uploads/2014/08/RR_Water-use-efficiency-and-water-productivity.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2016.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160p. (USDA Agricultural Handbook, 60).

ROBERTS, J.; NAYAMUTH, R.A.; BATCHELOR, C.H.; SOOPRAMANIEN, G.C.; Plant-water relations of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under a range of irrigated treatments. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 17, n. 1, p. 95-115, 1990.

ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C. Future research challenges for efficient crop water use in sugarcane production. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Mount Edgecombe, n. 16, p.193-200, 1994.

ROBERTSON, M.J. MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W.; CAMPBELL, J.A. Accumulation of reducing sugars by sugarcane: effects of crop age, nitrogen supply and cultivar. **Fields Crops Research**, Amsterdam v. 49, n. 1, p. 39-50, 1996.

ROBERTSON, M.J.; BONNETT, G.D.; HUGHES, R.M.; MUCHOW, R.C.; CAMPBELL, J. A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 25, n. 7, p. 819-828, 1998.

ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the componentes of cane and sucrose yield in response to drying-off before harvest. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, n. 3, p. 201-208, 1998.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, n. 3, p. 211-227, 1999.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 99 p. Disponível em: <<http://www.malavolta.com.br/pdf/1071.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2015.

RODRIGUES, L.D. **A cana-de-açúcar como matéria prima para a produção de biocombustíveis**: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para a mitigação. 2010. 64 p. Monografia (Especialização em Análise Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG. 2010.

RUNQUIST, D.; HAHN-HAGERDAL, B.; BETTIGA, M. Increased Ethanol Productivity in Xylose-Utilizing *Saccharomyces cerevisiae* via a Randomly Mutagenized Xylose Reductase. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 76, n. 23, p. 7796-7802, 2010.

SALASSIER, B. Manejo da Irrigação na Cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16, 2006, Goiás, GO. **Anais....** Brasília: ABID, 2006.

SAN JOSÉ, J.J.; MEDINA, E. Análisis de la productividad de caña de azúcar. I. crecimiento, desarrollo de la superficie foliar y contenido de clorofila de caña de azúcar 'PR 980'. **Turrialba**, San Jose, v. 20, n. 2, p. 143-8, 1970.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; SILVA, N.F.; CUNHA, F.N.; TEIXEIRA, M.B.; LOUREIRO SOARES, F.A.; RIBEIRO, P.H.P. Produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes reposições hídricas e nitrogênio em dois ciclos. **Irriga**, Botucatu, v. 1, p. 198-210, 2015.

SANTANA, M.J.; CARVALHO, J.A.; SOUZA, K.J.; SOUSA, A.M.G.; VASCONCELOS, C.L.; ANDRADE, L.A.B. Efeitos da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) e em solos com diferentes níveis texturais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1470-1476, 2007.

SANTOS, F.A.; QUEIROZ, J.H.; COLODETTE, J.L.; FERNANDES, S.A; GUIMARÃES, V.M ; REZENDE, S.T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1, p. 373-431.

SCARPARE, F.V.; GALDOS, M.V.; KOLLN, O.T.; GAVA, G.J.C.; FRANCO, H.J.; TRIVELIN, P.C.O. Increased sugarcane water productivity in Brazil avoids land use change and related environmental impacts. In: AMERICAN GEOPHYSICAL UNION FALL **Meeting...** San Francisco, 2012. 1p.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA L.L.; VASCONCELLOS, A.C.M.; LANDELL. M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas/SP: Instituto Agrônomo, 2008. p. 47-56.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.

SHAPIRO, S.S; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, n. 4, p. 591-611, 1965.

SHARPE, P. **Sugar Cane: Past and Present**. Illinois: Southern Illinois University. 1998. 6 p.

SHRIVASTAVA, A.K.; SRIVASTAVA, A.K; SOLOMO, K.S. Sustaining sugarcane productivity under depleting water resources. **Current Science**, Bangalore, v. 101, n. 6, p.748-754, 2011.

SILVA, D.K.T.; DAROS, E.; ZAMBOM, J.L.C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFELLATTO-RIBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; OLIVEIRA, R.A. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana soca no noroeste do Paraná na safra 2002/2003. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 47-53, 2005.

SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; SILVA, J.A.G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 3, p. 193-201, 2007.

SILVA, M.A.; JERONIMO, E.M.; LÚCIO, A.D.C. Perfilhamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 979-986, 2008.

SILVA, M.A.; ARANTES, M.T.; RHEIN, A.F.L.; GAVA, G.J. de C.; KÖLLN, O.T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 241-249, 2014.

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; CARMO, J.F.A.; BRANDÃO, E.O.; SOUZA, BASTOS, L.S. Análise da produtividade da água da cana-de-açúcar irrigada na região semiárida, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Campinas: SBA, 2009. 1 CD-ROM.

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 da água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, p.1257-1265, 2011.

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**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 500-509, 2012.

SILVA, V.P.R.; SILVA, B.B.; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGES, C.J.R.; SOUSA, I.F.; DANTAS NETO. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.128, p.102-109, 2013.

SIMÕES, W.L.; GUIMARÃES, M.J.M.; PINHEIRO, M.P.M.A.; LIMA, J.A.; AGUIAR, M.S.; SOUZA, M.A. Fator de forma para estimativa de área foliar de variedades de cana-de-açúcar irrigada no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 23., 2013, Luís Eduardo Magalhães. **Anais...** Brasília: ABID, 2013. 1 CD-ROM.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2, p. 291-303, 2005.

SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.98, n. 2, p.91-97, 2006.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, New York, v.25, n. 3, p. 189-207, 2007a.

STEDUTO, P.; KIJNE, J.W.; HANJRA, M.A.; BINDRABEN, P.S. Pathways for increasing agricultural water productivity. In: MOLDEN, D.; OWEIS, T.Y. **Water for food, Water for life: A comprehensive Assessment of water management in agriculture**. London: Earthscan, and Colombo: International Water Management, 2007b. 624p.

STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water**. Rome: FAO, 2012. 503 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 66).

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: avaliação do modelo Mosaic**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

TAKEDA, K.; FREY, J. Contributions of vegetative growth rate and harvest index to grain yield of progenies from Avena sativa X A. sterilis Crosses. **Crop Science**, Madison, v.16, p. 817-821, 1976.

TANJI, K.K.; KIELEN, N.C. **Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas**. Rome: FAO, 2002. 188p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 61).

TANNER, C.B.; SINCLAIR, T.R. Efficient water use in crop production: research or re-research? In: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. A.; SINCLAIR, T. R. (Ed.). **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison: ASA, 1983. p. 1-27.

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**, Amsterdam, v.102, n. 1, p. 64-72, 2007.

THANGAVELU, S. Harvest Index: Sugar yield in sugarcane genetic stocks and its association with yield attributes, nutrients ratio and sucrose. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 8, n. 2, p.148-151, 2006.

TOLEDO FILHO, M.R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar em Alagoas**. 2001. 168p. Tese (Fitotecnia/Agrometeorologia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

UCHÔA, S.C.P.; ALVES JUNIOR, H.O.; ALVES, J.M.A.; MELO, V.F.; FERREIRA, G.B. Resposta de seis variedades de cana-de-açúcar a doses de potássio em ecossistema de cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 4, p. 505-513, 2009.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAN HEERDEN, P.D.R.; DONALDSON, R.A.; WATT, D.A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 61, n. 11, p. 2877–2887, 2010.

VAZIFEDOUST, M.; DAM, J.C.; FEDDES, R.A.; FEIZI, M. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 2, p. 89-109, 2008.

VIANA, R.S.; MUTTON, M.A.; ZILLO, H. Índices de maturação da cana-de-açúcar quando submetida à aplicação de maturadores químicos. **Revista Mirante**, Anápolis, v. 8, n. 1, p. 99-109, 2015.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; DELAZARI, F.T. Indicadores morfofisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, Uberaba, v. 30, n. 3, p. 65-75, 2014.

WACLAWOVSKY, A.J.; SATO, P.M.; LEMBKE, C.G.; MOORE, P.H.; SOUZA, G.M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, Oxford, v. 8, n. 3, p. 1-14, 2010.

WATT, D.A.; MCCORMICK, A.J.; CRAMER, M.D. Source and Sink Physiology. In: MOORE P.H.; BOTHA, F.C. (Ed.). **Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology**. Oxford: Willey Blackwell, 2014. p. 483-520.

WILLADINO, L.; OLIVEIRA FILHO, R.A.; SILVA, E.A.; GOUVEIA NETO, A.S; CAMARA, T.R. Estresse salino em variedades de cana-de-açúcar: enzimas do sistema antioxidativo e fluorescência da clorofila. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 417-422, 2011.