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

**Eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com
base em medições de trocas gasosas IRGA: fotossíntese e transpiração**

Timóteo Herculino da Silva Barros

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2015**

Timóteo Herculino da Silva Barros
Engenheiro Agrônomo

**Eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com
base em medições de trocas gasosas IRGA: fotossíntese e transpiração**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Dissertação apresentada para obtenção do
título de Mestre em Ciências. Área de
concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2015**

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

Barros, Timóteo Herculino da Silva

Eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com base em medições de trocas gasosas IRGA: fotossíntese e transpiração / Timóteo Herculino da Silva Barros. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

109 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Irrigação 2. *Saccharum spp.* 3. Produtividade da água 4. Déficit hídrico 5. Eficiência do uso do carbono 6. Fotossíntese em cana-de-açúcar 7. Biomassa I. Título

CDD 633.61
B277e

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho,

A Deus, fonte de sabedoria, luz e força.

Aos meus queridos e amados pais Sebastião e Maria pela família maravilhosa que construíram e pelo dom incessante de nos estimular a fazer o bem sermos justos e perseverantes em cada dia vivido!

Ao meu irmão Tiago e a minha namorada Flávia, pela enorme paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS PESSOAIS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela força em cada momento nas realizações dos meus sonhos e sem dúvida esse é mais um deles.

Ao meu pai Sebastião, minha mãe Maria, pelo apoio constante de vocês, pelo carinho, a força dada por vocês tornou meus passos mais fáceis, vocês são minha inspiração.

Ao meu irmão Tiago, meu exemplo de luta e determinação, essa vitória é sua vitória.

A todos os meus familiares, em especial minha tias (os) Geruza, Severina, Graça e Rubens que de forma direta ou indireta contribuí na minha vida obrigado pelo apoio de vocês.

Aos meus primos (as) em especial ao Jocimar sempre presente nas horas das dificuldades e alegrias.

A minha querida namorada Flávia. Suas palavras, seu apoio, seu carinho, sua determinação contribuíram de forma incessante para meu sucesso.

Aos todos os meus amigos de graduação, meu amigos de infância: Fernando, Sergio, Seneval, Ricardo, Silvino, Célio (*in memoria*), Gene e todos os demais. A todos os professores que contribuíram e contribuem na minha formação, obrigado.

Aos meus amigos e companheiros de republicas: Arthur Prudêncio, Bruno Augusto, adijailton, Leôncio, Rony, Mateus, Christopher, Mineirinho e aos meus amigos: Luiz Aníbal, Pedro Andrade, Diogo judeu.

Ao DVATCOM, em especial as assistentes sociais Eliane, Solange, Áurea e Eliana, pela moradia na vila da Pós-graduação da ESALQ/USP e a todos os meus amigos moradores da vila.

AGRADECIMENTOS PROFISSIONAIS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, por acreditar e confiar na minha pessoa durante essa etapa de trabalho em conjunto. Os conselhos, orientações e durante esse período procederam acima de tudo em uma verdadeira amizade.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) juntamente com a Odebrecht Agroindustrial, Empresa Parceira no projeto PITE (BIOEN) 2012/50083-7 e a Universidade de São Paulo - USP (Instituição sede do projeto), obrigado.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas ESALQ/USP, pela oportunidade de fazer parte desta equipe.

A todos os meus amigos parceiros de projeto, Daniel Philipe Veloso Leal, Eusímio Felisbino Fraga Junior, Lucas da Costa Santos, Fernando Silva Barbosa, Nathália Lopes Ribeiro, Alex Nunes, Jéfferson Oliveira, Jonathan Vasquez, Marcos Amaral, Vinicius Perin Liz Rabelo, sem vocês nada disso seria possível, obrigado a toda equipe.

Aos meus amigos de Pós-graduação: Jefferson Vieira (Tudão), Osvaldo, Wagner, João, Otávio, Eder, Luiz, Bruno Lema, Asdrúbal, Maria, Acácio, Hermes, José Guilherme, Bruno, Ailson os quais contribuíram diretamente e indiretamente no projeto, obrigado a todos vocês.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas ESALQ/USP, pela oportunidade de fazer parte desta equipe.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, em especial aos que participaram diretamente da minha formação e da condução do experimento. Às secretárias; Angela, Beatriz e Davilmar, aos funcionários; Afonso, Agnaldo, Sr. Antonio, Áureo, Ezequiel, Gilmar, Hélio, José Geraldo, Juarez, Luiz, Marinaldo e Paula obrigado.

Ao Prof. Dr. Sérgio Nascimento Duarte, Dr. Talei Arrial Botrel, Dr. Luiz Roberto Angelocci agradeço pela compreensão que tiveram durante meu exame de qualificação, sugerindo e apoiando as mudanças necessárias para a realização deste trabalho. Também agradeço aos demais professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pelos ensinamentos e confiança.

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta participaram dessa fase da minha vida, ajudando, orientando, obrigado.

A ciência hoje é a tecnologia amanhã.

Edward Teller

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	23
1 INTRODUÇÃO.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 A cultura da cana de açúcar e sua importância.....	27
2.2 Origem da cana-de-açúcar	28
2.3 Características da planta	29
2.3.1 Sistema Radicular da Cultura	30
2.3.2 A Folha	31
2.4 Relações hídricas na cana de açúcar.....	33
2.5 Respostas da fotossíntese.....	35
2.6 Principais instrumentos para medição das trocas gasosas em ambiente de produção e científico	36
2.7 Produtividade da água (PA) e eficiência do uso da água (EUA).....	38
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	39
3.2 Caracterizações química e físico-hídrica dos solos	40
3.2.1 Caracterização da fertilidade do solo.....	41
3.3 Monitoramentos climáticos	44
3.4 Sistema de irrigação e automação	44
3.5 Seleções das mudas – UFSCAR / IAC E CTC.....	46
3.5.1 Condução das mudas	47
3.5.2 Transplântio das Mudas Pré-Brotadas - MPB	47
3.6 Tratamentos e delineamentos experimentais.....	48
3.7 Determinações da área de análise das trocas gasosas.....	49
3.8 Tratos culturais	51
3.9 Determinações da região da folha para análise	51
3.10 Controles do ambiente com o Analisador de gases por infravermelho – IRGA	52
3.10.1 Controle de CO ₂	52

3.10.2 Controle de H ₂ O.....	53
3.10.3 Controle de temperatura.....	53
3.10.4 Controle de luz.....	53
3.11 Variáveis mensuradas nos experimentos (Relacionados ao IRGA).....	54
3.11.1 Épocas das medidas (Relacionados ao IRGA).....	55
3.12 Variáveis mensuradas nos experimentos (Relacionados à Biomassa).....	55
3.13 Produtividade da água para biomassa - PAB (kg m ⁻³).....	55
3.14 Relação Produtividade da água estimada com o IRGA e Produtividade da água medida em experimento (Eficiência do uso da água).....	56
3.15 Fixação de carbono	56
3.16 Produtividade da água estimada para biomassa.....	57
3.17 Análise de resultados	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Avaliação das condições ambientais dentro da estufa nos dias de medições	59
4.2 Análises das Trocas gasosas com as variedades V3, V4 e V7 (experimento 1).....	63
4.3 Análises das trocas gasosas para as oito variedades (Experimento 2).....	73
4.4 Eficiência do Uso da Água – EUA e Eficiência intrínseca do Uso da Água EiUA.....	79
4.5 Respostas fotossintéticas ao aumento da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativo - DFFFA.....	81
4.5 Análise descritiva multivariada – Análise de componentes principais – ACP.....	84
4.6 Produção de biomassa de cana-de-açúcar.....	86
4.7 Estimativas de fixação de carbono na biomassa e do particionamento na cana-de-açúcar.....	92
4.8 Produtividades da água e do carbono.....	96
4.9 Produção relativa L50/L100 para fotossíntese instantânea medida com o analisador de gases por infravermelho – IRGA e para biomassa medida no experimento.....	99
5 CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS.....	103

RESUMO

Eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com base em medições de trocas gasosas IRGA: fotossíntese e transpiração

A cana-de-açúcar apresenta-se como umas das principais culturas do agronegócio no Brasil e está integrada à matriz energética nacional, servindo também como matéria prima para diversos produtos industrializados. Em virtude das alterações nos padrões de precipitação natural que está ocorrendo em várias regiões do mundo, observam-se perdas significativas de produtividade na cana-de-açúcar devido ao déficit hídrico no solo, sendo esse um dos principais entraves atuais para maximização e para produtividade desta cultura. A busca por variedades resistentes ao estresse hídrico nos programas de melhoramento genético tem procurado selecionar genótipos que convertam de maneira mais eficiente à transpiração da planta em biomassa, evitando a perda de água excessiva para a atmosfera, de modo tal que a planta “economize a água do solo” para poder sobreviver posteriormente durante os períodos de estiagem. Este trabalho tem por hipótese que seja possível estimar a eficiência do uso da água (produtividade da água) e o acúmulo final de carbono na cultura de cana-de-açúcar em diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo, através de medidas pontuais da taxa de fotossíntese e transpiração (IRGA – Trocas gasosas) nos estágios iniciais e intermediários de crescimento da cultura. O presente trabalho tem por objetivo avaliar, de forma comparativa, variáveis relacionadas às trocas gasosas de oito variedades de cana-de-açúcar quando submetidas a déficit hídrico durante a fase inicial de crescimento vegetativo. O experimento foi conduzido em ambiente protegido na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP), em Piracicaba-SP. Os tratamentos foram distribuídos em esquema fatorial (4x4x8) com parcelas sub-subdivididas com 3 repetições, totalizando 128 tratamentos e 384 parcelas experimentais. As mensurações de trocas gasosas foram realizadas entre 45 e 195 dias após início do ciclo cana soca sob condições controladas de luz e CO₂. As quatro lâminas de irrigação utilizadas foram L50, L75 L100 e L125. Na lâmina L100 a umidade do solo foi mantida próxima à capacidade de campo (θ_{cc}) ao longo de todo experimento, nas demais lâminas aplicou-se uma fração da L100. Verificou-se que o estresse hídrico afetou as trocas gasosas: fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática e eficiência do uso da água. Os valores de produtividade da água reais medidos no experimento oscilaram entre 5 a 9 kg de matéria seca m⁻³ de água evapotranspirada. Os maiores acúmulos de biomassa foram observados para as variedades V1, V2 e V4 na lâmina de irrigação de 100%, com mais de 80 t ha⁻¹ de biomassa seca. A produtividade da água real de uma variedade de cana-de-açúcar pode ser estimada com base em medidas de trocas gasosas, porém deverá ser aplicado um fator de correção específico para cada variedade que oscila entre 3,1 e 5,2 para a lâmina de 100 %.

Palavras-chave: Irrigação; *Saccharum spp.*; Produtividade da água; Déficit hídrico; Eficiência do uso do carbono; Fotossíntese em cana-de-açúcar; Biomassa

ABSTRACT

Water use efficiency in sugarcane drip irrigated based on gas exchange measurements IRGA: photosynthesis and transpiration

Sugarcane crop is one of the main crops of agribusiness in Brazil and is integrated into the national energy matrix, also serving as raw material for various industrial products. Due to changes in natural precipitation patterns taking place in various regions of the world in recent years, there are significant losses of productivity in sugarcane due to water deficit in the soil, making a major current obstacle to maximizing this crop productivity. The search for varieties resistant to water stress in breeding programs has sought to select genotypes that convert more efficiently the transpiration of the plant, avoiding excessive loss of water to the atmosphere, such that the plant "save water in the soil" in order to survive during periods of drought in the future. This work has the primary hypothesis that it is possible to estimate the water use efficiency (water productivity) and the final accumulation of carbon in the sugarcane crop at different soil water levels availability through localized measurements of photosynthesis and transpiration (IRGA - Gas exchange equipment) during initial and intermediate stages of crop growth. This study aims to evaluate, on a comparative basis, variables related to gas exchange for 8 varieties of sugarcane subjected to water stress during early vegetative growth. The experiment was carried out under greenhouse conditions at Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP) in Piracicaba-SP / Brazil. The treatments were distributed in a factorial scheme (4x4x8) with sub-divided plots with three repetitions, totaling 128 treatments and experimental units. Measurements of gas exchange took place between 45 and 195 days after the beginning of the sugarcane cycle ratoon under controlled conditions of light and CO₂. The four irrigation depths used were L50, L75 L100 and L125. In the L100 treatment soil moisture was kept close to field capacity (θ_{cc}) throughout the experiment; L50, L75 and L125 received a fraction of the L100. It was found that water stress affected plant gas exchange: net photosynthesis, transpiration, stomatal conductance and water use efficiency. The actual water use efficiency (water productivity) measured in the experiment varied between 5 and 9 kg of dry matter m⁻³ of evapotranspired water. The highest accumulation of biomass were observed for varieties V1, V2 and V4 on the L100 irrigation treatment, up to 83 t ha⁻¹ dry matter (V1). Water use efficiency (water productivity) of sugarcane varieties can be estimated based on measurements of gas exchange, but must be assigned a specific correction variety factor ranging between 3.1 and 5.2 for the L100 treatment.

Keywords: Irrigation; *Saccharum spp.*; Water productivity; Water deficit; Carbon use efficiency; Photosynthesis in sugarcane; Biomass

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da morfologia da folha, bainha e da articulação entre eles Produzida por Martin (1938) presente no Livro Sugarcane Physiology Biochemisthy & Finctional Biology 2013.....	32
Figura 2 – Ordenação das folhas de cana-de-açúcar pelo sistema adaptado por Kuijper e adaptado por Van Dillewijn (1952)	33
Figura 3 – Localização de Piracicaba no estado de São Paulo (A); Local de instalação da estufa no Departamento de Engenharia de Biossistemas ESALQ/USP (B), casa de vegetação onde o projeto foi conduzido (C)	39
Figura 4 - Vista externa (a) e interna (b) da casa de vegetação.....	40
Figura 5 - Detalhe das parcelas experimentais (6 parcelas os retângulos em azul representam as caixas onde a cultura foi instalada).....	41
Figura 6 - Estação climatológica composta por sistema de aquisição de dados (A), sensores de captação de informações climatológicas (B)	44
Figura 7 - Painel de controle irrigação (a), identificação das parcelas experimentais nos terminais dos microtubos	45
Figura 8 - Plantio das gemas de cana de açúcar em bandejas (A), condução das mudas até transplantio (B)	47
Figura 9 - Muda transplantada já em casa de vegetação definitiva até o fim do ciclo (A) e (B)	48
Figura 10 - SunScam equipamento usado para monitoramento do comportamento da irradiação solar nas parcelas experimentais (A), mapa de irradiação dentro da estufa ($\mu\text{mol F\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e região escolhida para medições das trocas gasosas (B)	50
Figura 11 - Croqui do delineamento experimental.....	50
Figura 12 - Câmera térmica FLIR T640 (A); Imagem termográfica (B)	52
Figura 13 - Analisador de fotossíntese modelo LI-6400 XT (Licor, Lincoln NE, USA) (a), monitoramento das trocas gasosas em casa de vegetação (b), (c) e (d)	54
Figura 14 - Variação da temperatura diurna durante os dias de análises das trocas gasosas. (A) variação da temperatura durante o dia, intervalo em que as coletas de dados foram realizadas, os pontos na cor vermelha representa (B), (C), (D), (E), (F), (G), (H) e (I), mostram o mesmo intervalo de horários em que as medições foram realizadas, as quais estão agrupadas na figura (L). Já a figura (J) a variação da temperatura	

máxima e mínima referente a trocas gasosas durante os meses de abril, maio, junho, julho e agosto de 2014..... 61

Figura 15 – Fotossíntese (folha +1) para as variedades V3, V4 e V7 de cana-de-açúcar submetidas às lâminas de 50, 100 e 125 %, cultivadas em casa de vegetação a partir da imposição das lâminas de irrigação. As barras indicam o desvio padrão da média de 4 observações. (A), (B) e (C) variedade em função da lâmina de irrigação. A concentração de CO₂ no ar, durante as medições são fixados em 400 ± 5 µmol- e a irradiação foi fixada em 1000 µmol m⁻²s⁻¹..... 63

Figura 16 - Fotossíntese (folha +1) das variedades V3,V 4 e V7 de cana-de-açúcar submetidas às lâminas de 50, 100 e 125 %, cultivadas em casa de vegetação a partir da imposição das lâminas de irrigação. As barras indicam o desvio padrão da média de 4 observações. (a), (b) e (c) lâminas de irrigação em função da variedade. CO₂ e luz fixados em 400 ± 5 µmol e 1000 µmol m⁻²s⁻¹ 64

Figura 17 - Condutância estomática das variedades V3, V4 e V7 de cana-de-açúcar submetidas a 3 lâminas de irrigação e cultivadas em casa de vegetação. A concentração de CO₂ no ar, durante as medições foram fixados em 400 ± 5 µmol-1 e a irradiação foi artificialmente fixada em 1000 µmol m⁻² s⁻¹ 65

Figura 18 - Taxa transpiratória de três variedades de cana de açúcar submetidas a três lâminas de irrigação cultivadas em casa de vegetação. A concentração de CO₂ no ar, durante as medições foram fixados em 400 ± 5 µmol-1 e a irradiação foi artificialmente fixada em 1000 µmol m⁻² s⁻¹. As lâminas aplicadas foram de 50%, lâmina de 100% e lâmina de 125% 66

Figura 19 - Relação entre transpiração e condutância estomática das variedades V3, V4 e V7 para as lâminas de irrigação de 50,100 e 125 % com intervalo de confiança de 95% 67

Figura 20 - Eficiência do uso da água – EUA µmol CO₂ / mmol H₂O para cana-de-açúcar submetida a três lâminas de irrigação dentro de cada variedade 70

Figura 21 - Eficiência do uso da água em µmol CO₂ / mmol H₂O para três variedades de cana-de-açúcar dentro de cada lâmina de irrigação 71

Figura 22 - Relação entre a fotossíntese e a transpiração das variedades V3, V4 e V7 simultaneamente, para as lâminas de irrigação de 50, 100 e 125% 72

Figura 23 – Resumo da assimilação de CO₂ µmol (CO₂ m⁻² s⁻¹) (folha +1) de oito variedades de cana de açúcar submetidas a quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100 e 125%, cultivadas em casa de vegetação. A concentração de CO₂ no ar, durante as

- medições foram fixados em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$ e a irradiação fixada em 800, 1000 e $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 73
- Figura 24 – Taxa de assimilação de CO_2 (Fotossíntese líquida) em oito variedades de cana de açúcar submetidas a quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100 e 125%, cultivadas em casa de vegetação. A concentração de CO_2 no ar, durante as medições foi fixada em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$ e a irradiação foi mantida constante em $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 75
- Figura 25 – Taxa transpiratória ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) nas oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento sob quatro lâminas de irrigação: 50, 75 100 e 125% 76
- Figura 26 – Variação da condutância estomática $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em oito variedades de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, com quatro condições de manejo. Medições realizadas nos horários das 9 as 12:00 horas..... 77
- Figura 27 – Variação da condutância estomática $\text{mol (H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})$ em relação às lâminas usadas em oito variedades de cana-de-açúcar. Cada lâmina possui informações das oito variedades. Gráfico de violino ou Vainlin-plot 79
- Figura 28 – Variação da eficiência do uso da água – EUA (Fotossíntese / Transpiração $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$) e eficiência intrínseca do uso da água - EiUA (Fotossíntese / Condutância estomática $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$) em oito variedades de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, com quatro condições de manejo. Medições realizadas nos horários das 9 às 12:00 horas..... 80
- Figura 29 – Eficiência instantânea da carboxilação – A.Ci (Fotossíntese / concentração interna de CO_2) analisados nas oito variedades de cana-de-açúcar e nas quatro lâminas de irrigação, Sendo analisados nas folhas + 1 de cada variedade nas quatro lâminas de irrigação sendo elas 50, 75, 100 e 125% nas figuras A, B, C e D respectivamente 81
- Figura 30 – Resposta da assimilação de CO_2 (fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ao aumento da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativa $\mu\text{mol Fótons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ em oito variedades de cana-de-açúcar irrigada, 30 dias após as lâminas serem impostas, sendo analisados nas folhas + 1 de cada variedade, ns não significativo ao nível de 5% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% 83
- Figura 31– Resposta da temperatura do ar e da folha $^{\circ}\text{C}$ analisados simultaneamente as curvas de assimilação de CO_2 nas oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas 84
- Figura 32 – Biplot dos principais parâmetros fisiológicos na cultura da cana-de-açúcar 86
- Figura 33 – Desdobramento dos valores de biomassa total da parte aérea por parcela (duas touceiras) em kg para as oito variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina (Figura A, B, C e D) referem-se a ciclo da cana planta Dados de (Barbosa,

2015). Já as (Figuras E, F, G e H) referem-se ao ciclo da cana soca * 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 Knot	88
Figura 34 – Análise de variância para produção de biomassa da parte área – kg para o conjunto das oito variedades de cana-de-açúcar nas lâminas de irrigação de 50, 75, 100, e 125% no ciclo da cana planta	89
Figura 35 – Análise de variância para produção de biomassa da parte área - kg para o conjunto das oito variedades de cana-de-açúcar nas lâminas de irrigação de 50, 75, 100, e 125% no ciclo da cana soca.....	90
Figura 36 – Total de biomassa de cana de açúcar em toneladas por hectare e total de biomassa em toneladas produzido por hectare nas quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100 e 125%* independente da variedade para o ciclo cana planta e cana soca	91
Figura 37 – Total de biomassa de cana de açúcar em toneladas por hectare produzido por hectare nas oito variedades de cana e açúcar submedidas as lâminas de 50, 75, 100 e 125%*	91
Figura 38 – Total de Carbono fixado na fitomassa de cana de açúcar em toneladas por hectare nas quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100 e 125%* média das oito variedades para o ciclo cana planta e cana soca	92
Figura 39 – Composição do percentual de carbono média fixado em cada parte da cana-de-açúcar: colmos, bainhas, folhas, despontes e perfilhos mortos para as oito variedades estudadas no ciclo cana soca irrigado com lâmina de 100%	93
Figura 40 – Percentual do carbono para as oito variedades estudadas, nas dentro de cada lâmina de irrigação. (A) percentual do carbono das hastes ou colmo, (B) folhas, (C) bainhas, (D) despontes e (E) perfilhos mortos	95
Figura 41 – Valores de produtividade da água para biomassa total – PAB em quilogramas de biomassa por metro cúbico de água aplicada para as oito variedades estudadas, nas dentro de cada lâmina de irrigação (A) e produtividade da água para biomassa total – PAB na lâmina independente das variedades (B). ns não diferem significativamente entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott	96
Figura 42 – Valores de produtividade da água estimada para biomassa – PABE (medido com o IRGA) em quilogramas de biomassa por metro cúbico de água aplicada para as oito variedades estudadas, nas dentro de cada lâmina de irrigação. ns não diferem	

significativamente entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott..... 98

Figura 43 – Relação entre a Produtividade da água pra biomassa estimada – PABE com o analisador de gases por infravermelho e produtividade da água para biomassa medida no experimento – PABM..... 99

Figura 44 – Relações das taxas de percentual da matéria seca da biomassa de cana de açúcar na lâmina de 50% com a lâmina de 100%. Relações do monitoramento de fotossíntese das oito variedades de cana de açúcar na lâmina de 50% com a lâmina de 100% e a diferença percentual da biomassa medida com o monitoramento das respectivas lâminas 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Séries históricas da produção e da produtividade de cana de açúcar nas ultimas dez safras da cultura	28
Tabela 2 - Caracterização físico-hídrica do solo	41
Tabela 3 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes no início do ciclo cana realizadas logo após o fim do ciclo cana planta (mês de março de 2014) para as oito variedades nas quatro lâminas de irrigação	41
Tabela 4 – Resultado da análise química do solo para micronutrientes no início do ciclo cana realizadas logo após o fim do ciclo cana planta (mês de março de 2014) para as oito variedades nas quatro lâminas de irrigação	43
Tabela 5 - 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)	46
Tabela 6 – Teste de médias para três lâminas de irrigação, analisando fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, transpiração $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e condutância estomática $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, teste realizado dentro das lâminas pelo teste de Scott-Knott (1974) com 5% de probabilidade.....	68
Tabela 7 – Teste de médias para três variedades de cana-de-açúcar, cultivada sob irrigação, fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, transpiração $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e condutância estomática $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, teste realizado dentro das lâminas pelo teste de Scott-Knott (1974) com 5% de probabilidade	68
Tabela 8 - Desdobramento das variedades dentro das lâminas e das lâminas dentro das variedades para análise da fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, condutância estomática $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e transpiração $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott	69
Tabela 9 - Teste de médias para três variedades de cana-de-açúcar, cultivada sob irrigação, para eficiência instantânea do uso da água – EUA $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$, teste realizado dentro das lâminas e das variedades pelo teste de Scott-Knott (1974) com 5% de probabilidade.....	71
Tabela 10 - Desdobramento das variedades dentro das lâminas e desdobramento das lâminas dentro das variedades para análise da eficiência instantânea do uso da água em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}$ pela cana de açúcar ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott	72

Tabela 11 - Desdobramento das variedades e lâminas para análise da fotossíntese $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Calinski e Corsten.....	75
Tabela 12 – Análise de variabilidade explicada pelos componentes principais	85
Tabela 13 – Determinação dos pesos das variáveis em cada componente principal - PCR para as variáveis: fotossíntese, condutância estomática, concentração intercelular de CO_2 – C_i e transpiração	85

1 INTRODUÇÃO

A cada dia as necessidades por combustíveis e energia aumentam acima da taxa de crescimento populacional e com isso os produtos conhecidos como biocombustíveis e energias limpas vêm ganhando destaque no setor energético. Atualmente a cada litro de gasolina comercializado no país, 25% são de biocombustíveis - Ministério das Minas e Energia – MME. A atividade passa a ser extremamente competitiva, em todos os setores da cadeia produtiva, principalmente na área de melhoramento genético, devido às necessidades do mercado de desenvolver cultivares mais adaptadas aos mais diversos cenários de produção de culturas bioenergéticas em território nacional.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar; a cultura apresentava até recentemente, um cenário forte de expansão no país, ocupando hoje áreas que antes estavam sendo exploradas pela pecuária de corte, substituindo as áreas degradadas de pastagens que estão praticamente improdutivas, e dando espaço ao setor sucroalcooleiro. No Brasil a safra de cana-de-açúcar 2013/2014 apresentou um acréscimo na área de 3,8% comparado com a safra 2012/13. O crescimento citado está relacionado com a expansão da área da região Centro-Sul do país (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2013).

A preocupação com a água é um assunto que ganha repercussões mundiais constantes devido ao seu potencial de disputa entre atividades produtivas e os seres vivos. A história ressalta que as técnicas de irrigação são fatores de riqueza, prosperidade e, conseqüentemente, faz parte da segurança alimentar da sociedade moderna. Atualmente mais da metade da população mundial necessita de alimentos produzidos pela agricultura irrigada, o que reforça a utilização da técnica milenar (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI 2009).

Dos diversos problemas que a agricultura vem enfrentando no decorrer dos séculos o déficit hídrico no solo afeta grande parte da agricultura mundial, principalmente no que diz respeito às perdas de produtividade das culturas (TAIZ; ZEIGER 2013). A alta eficiência nos sistemas de produção apresenta-se como a base para manutenção do país em destaque no setor mundial. Sendo assim, o conhecimento dos indicadores morfológicos e fisiológicos correlacionados ao cultivo em condições de estresse hídrico é fundamental para a seleção de genótipos tolerantes as condições menos favoráveis aos cultivos, além de auxiliar na economia do recurso natural mais importante no planeta, a água.

Este trabalho tem por hipótese que seja possível estimar a produtividade da água real (eficiência do uso da água) e o acúmulo final de carbono na cultura de cana-de-açúcar sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo, através de medidas pontuais da taxa de fotossíntese e transpiração (IRGA – Trocas gasosas) nos estágios iniciais e intermediários de crescimento da cultura, de modo tal que não seja necessário à condução das plantas durante todo o ciclo de crescimento para a estimativa da biomassa produzida.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar, de forma comparativa, variáveis relacionadas às trocas gasosas de oito variedades de cana-de-açúcar quando submetidas a déficit hídrico durante a fase inicial e de crescimento vegetativo, visando auxiliar a tomada de decisão para seleção de variedades nos programas de melhoramento, maximizando o plantio em áreas irrigadas e de sequeiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da cana de açúcar e sua importância

As diferentes espécies de *Saccharum* evoluíram sob condições elevadas de irradiação solar, temperaturas e demanda hídrica a cana é uma cultura perene de grande porte, proveniente de regiões tropicais e subtropicais, adaptada a um amplo zoneamento climático, que vai da latitude 35° norte a -35°sul da linha do Equador (BLUME, 1985). Segundo a Food and Agricultural Organization of the United Nations - FAO (2009) os subprodutos da cana (etanol / açúcar) são commodities de comércio internacional, produzidos por cerca de 100 países em uma área de 23,8 milhões de hectares, representando aproximadamente 1,5 % da área total cultivada no mundo (CALGARO; COELHO, 2015).

Destaca-se como uma importante cultura fornecedora de matéria prima para produção de açúcar, álcool, aguardente, açúcar mascavo, rapadura, melado e desde os tempos remotos pode ser utilizada como alimentação animal e mais recentemente a cultura é alvo na produção de bioenergia contribuindo substancialmente com a economia dos países produtores (FAO, 2009).

A cana-de-açúcar mostra-se como uma das plantas mais produtivas do planeta em termos de acúmulo de biomassa por unidade de área, chegando a atingir picos de produção de matéria seca de mais de 100 t ha⁻¹ (IRVINE, 1983; WACLAWOVSKY et al., 2010). Esses altos valores relatados na literatura estão relacionados com uma série de fatores os quais merecem destaque: trata-se de uma cultura de regiões tropicais a subtropicais quentes, suportam altas taxas de crescimentos, apresentam períodos de crescimentos longos, comparadas com outras culturas, chegando até 24 meses, (conhecidas como variedade tardias ou cana de dois anos). Outro fator que torna a planta eficiente é a sua densa área foliar com folhas dispostas de maneira alternadas, o que favorece os fótons de luz atingirem as folhas mais velhas localizadas na parte inferior do dossel vegetativo, dessa forma praticamente 100% da irradiação é interceptada pelas folhas da cultura (IRVINE, 1983).

Atualmente o setor vem ganhando destaque pelo interesse de vários países em utilizar a cana como matéria prima para produção de energia. (RENOUF; WEGENER; NIELSEN 2008) atribui esse interesse ao seu balanço energético que é potencialmente positivo. (Dantas Neto et al., 2006) ressaltam a utilização dessa cultura como uma nova matriz energética; em termos comparativos cada tonelada de cana-de-açúcar tem potencial energético equivalente a 1,2 barris de petróleo.

O Brasil apresenta-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Embora o setor canavieiro esteja passando por dificuldades econômicas em função do cenário político atual de controle de preço da gasolina (Petrobrás), a cultura apresenta perspectivas futuras de expansão no país, sendo elas ocupar áreas de pecuária de corte, substituindo-se as áreas degradadas de pastagens com baixa produtividade e dando espaços a uma agricultura mais empresarial. Na safra 2013/14 o Brasil teve um acréscimo nas áreas plantadas de 3,8% comparado com a safra 2012/13 (CONAB, 2013).

O crescimento citado está relacionado com a expansão da área da região Centro-Sul do país. A região Norte/Nordeste praticamente se mantém com a mesma área para a próxima safra. São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais deverão ser os estados com maior acréscimo de áreas com 132,6 mil hectares, 92,5 mil hectares, 81,4 mil hectares e 58,0 mil hectares, respectivamente; em termos de produção, a safra 2013/14 teve aumento de 11,86% comprado com a safra 2012/13. Na safra 2014/15 a estimativa de produção é 642 milhões de toneladas o que corresponde redução de 2,53% com a safra passada, essa redução apresenta-se como reflexo do que o setor vem sendo acometido. A Tabela 1 apresenta a série histórica da produção e da produtividade para cultura da cana-de-açúcar desde a safra 2005/06 até os dias atuais (CONAB, 2015).

Tabela 1 - Séries históricas da produção e da produtividade de cana de açúcar nas ultimas dez safras da cultura

Série histórica da produção (Mil toneladas)										
REGIÃO/UF	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15 *
NORTE/NC	57.673	64.122	69.217	65.510	61.669	63.358	66.017	55.930	56.713	59.233
CENTRO-S	373.740	410.678	502.154	505.925	542.845	560.547	494.938	532.986	602.109	582.862
BRASIL	431.413	474.800	571.371	571.434	604.514	623.905	560.955	588.916	658.822	642.095
Série histórica da produtividade (kg/ha)										
NORTE/NC	55.063	56.089	65.430	61.302	56.074	55.926	57.460	49.706	52.678	57.699
CENTRO-S	78.915	81.808	84.363	84.476	86.032	80.968	68.613	72.419	77.844	73.060
BRASIL	74.318	77.038	81.506	80.965	81.585	77.446	67.081	69.407	74.769	71.308

*Estimativa para safra de cana-de-açúcar 2014/15 (CONAB 2015)

2.2 Origem da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar trata-se de uma planta alógama e perene no que diz respeito a sua forma natural de ocorrência. Suas bases históricas retratam que os primeiros vestígios da sua presença foram em uma área vasta do sudoeste da Ásia incluindo o arquipélago Malaio, Nova Guiné, Índia e outros grupos de ilhas pertencentes à Melanésia. As preponderâncias de evidências indicam que a domesticação de cana-de-açúcar provavelmente ocorreu em Nova

Guiné, com a seleção de *S. officinarum* da espécie selvagem *S. robustum* (DANIELS; ROACH, 1987; GRIVET; GLASZMANN; D'HONT 2006).

Hipóteses referentes à contribuição do gênero *Saccharum*, especificamente *Erianthus*, *Sclerostachya*, *Narenga* e *Miscanthus* são citadas por (BRANDES, 1956; MUKHERJEE, 1957) para entendimento da origem da cana-de-açúcar, para essa confirmação estudos foram baseados em citologia e reprodução além de evidências da morfologia e sobreposição geográfica da sua distribuição. Essas hipóteses foram revisadas por (DANIELS; ROACH 1987), que fez uma revisão literária científica que apoiou o cenário desenvolvido, além disso, essa hipótese foi complementada por dados de análises moleculares confirmando assim que essa região realmente abriga o berço genético da cana-de-açúcar (GRIVET; GLASZMANN; D'HONT 2006).

2.3 Características da planta

Suas atuais variedades são híbridas interespecíficas, sendo que em sua constituições genéticas são encontradas as espécies de *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule*. A cana-de-açúcar apresenta sua reprodução sexuada, no entanto quando as plantas são cultivadas comercialmente, a forma de multiplicação é assexuadamente através de propagação vegetativa (MATSUOKA; GARCIA; ARIZONO, 2005). Quando se menciona “semente botânica” de cana-de-açúcar essa semente na verdade trata-se de um fruto do tipo cariopse, nas Regras para Análise de Semente – RAS. O cariopse está descrito como sendo um fruto simples, seco, indeiscente, unisseminado, cujo tegumento está condescido com o pericarpo em toda sua extensão (DORNELAS; RODRIGUEZ 2001).

Segundo Daniels e Roach (2001) no sistema de reprodução na forma assexuada, a fase inicial de crescimento das mudas é lento, muito semelhante aos de grãos de cereais e com precoce crescimento, a partir de gemas-tronco. No entanto, uma vez que a fase de crescimento adulto é estabelecida, as plantas produzidas por estes dois métodos (sexuada e assexuada) são praticamente indistinguíveis (GALON et al., 2009)

2.3.1 Sistema Radicular da Cultura

A cana-de-açúcar apresenta um sistema radicular altamente ramificado e do tipo fasciculado. Segato et al. (2006) afirma que 85% da massa de raízes total encontram-se nos primeiros 50 cm de profundidade, e 60% dessa massa encontra-se na camada de 20 a 30 cm. Além disso, as morfologias dessas raízes apresentam grandes variações na planta.

As mudanças na anatomia das raízes da cana em resposta a estresses bióticos ou abióticos têm sido examinada numa série de estudos com o objetivo de identificar mecanismos de resistência da cultura para os ecossistemas em que ela é cultivada. O aerênquima trata-se de uma adaptação de tecidos parenquimáticos no qual podem ser observados através dos grandes espaços intercelulares que ficam interligados e preenchidos com gases. Há basicamente dois tipos de mecanismo na formação do aerênquima: o primeiro é o esquizógeno que é formado por separação celular e o segundo lisígeno desenvolvido por morte celular (ESAU, 1977). O aerênquima lisígeno desenvolve-se nos tecidos corticais de raízes mais velhas em seu maior percentual. Entretanto são encontradas nas raízes jovens de plantas que crescem em solos encharcados. A extensão do aerênquima é correlacionada com a manutenção de um crescimento durante inundações do solo e pode-se estender para os tecidos de colmos em variedades resistentes (GILBERT et al., 2007).

Vale salientar que a morfologia das raízes contribui para diversas ações de microrganismos presentes no solo e que podem ser colonizadas por microrganismos benéficos, tais como *Gluconacetobacter diazotrophicus*, uma bactéria do solo que é capaz de fixar nitrogênio atmosférico e por fungos micorrízicos arbusculares - FMAs (JAMES; REIS; OLIVARES, 1994).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) formam associações simbióticas com a maioria das plantas vasculares terrestres. Esta associação ocorre em cerca de 70% das espécies vegetais com ampla distribuição nos ecossistemas terrestre (SMITH; READ, 1997). Dentre as diversas espécies de plantas que podem ser colonizadas por esses fungos, destaque para cana-de-açúcar e sua importância no Brasil e no mundo, a associação dessa comunidade de fungos geralmente acarreta em benefícios para a cultura como melhor desenvolvimento vegetal devido ao aumento na absorção de água e nutrientes, com destaque para os elementos fósforo (P), zinco (Zn) e cobre (Cu) pelas hifas do FMA, os fungos conectam as raízes com solo aumentando assim o volume de solo a ser explorado, maximizando a área de contato das raízes tornando-as mais eficientes (SHENG et al., 2008).

2.3.2 A Folha

As folhas da cana-de-açúcar podem ser divididas em lâmina, a folha propriamente dita com uma nervura central de forma engrossada; a bainha que envolve o colmo em pleno desenvolvimento (Figura 1); as folhas jovens em plena expansão celular e a uma junta articulada entre a bainha e a folha chamada de colar (NELSON, 2011). A estrutura complexa das folhas das plantas C4 apresenta o sistema vascular disposto de forma longitudinal todos ligados por feixes transversais que tem papel fundamental no transporte dos fotoassimilados pela planta.

Van Dillewijn, (1952) relata que a senescência e substituição das folhas ocorrem de forma continua durante todo o ciclo da cultura, sendo que o número médio de folhas verdes fica estabilizado entre 9 a 10 folhas vivas por colmo, sendo este valor muito dependente das condições hídricas no solo.

Marchiori, Machado e Ribeiro, (2010) ressalta a variação da taxa de assimilação de CO₂ nos extratos superiores e inferiores de variedades de cana-de-açúcar. O autor menciona que as reduções podem ser de três a quatro vezes no extrato inferior quando comparado com o extrato superior do dossel da cultura.

As folhas da cana-de-açúcar podem apresentar comprimento e largura extremamente variada, o que está relacionado diretamente com o fator genético das variedades e das condições as quais a cultura está sendo submetida. Em termos médios, os comprimentos das folhas de cana-de-açúcar variam de 0,60 m a 1,5 m, e largura que variam de 2,5 cm a 10 cm (GODOY, 2007).

Figura 1 – Esquema da morfologia da folha, bainha e da articulação entre eles Produzida por Martin (1938) presente no Livro Sugarcane Physiology Biochemisthy & Finctional Biology 2013

As folhas da cana-de-açúcar podem ser ordenadas seguindo o sistema de Kuijper, esse sistema ajuda nos estudos voltados para o crescimento da cultura e condições nutricionais da mesma. O sistema de classificação da ordenação das folhas sugere que elas devam ser contadas de cima para baixo (GLASZIOU; BULL, 1965). A folha da inserção mais alta que se encontra completamente expandida e apresenta a lígula completamente visível, recebe a nomenclatura de folha + 1, a baixo dessa folha base às demais recebem de folhas + 2, + 3, + 4 Figura 2 (VAN DILLEWIJN, 1952).

Figura 2 – Ordenação das folhas de cana-de-açúcar pelo sistema adaptado por Kuijper e adaptado por Van Dillewijn (1952)

2.4 Relações hídricas na cana de açúcar

A necessidade de biocombustíveis (etanol) em vários países tem promovido à ampliação da área total de cana-de-açúcar cultivada no mundo. Olivette, Nachiluk e Francisco (2010) destacam que a introdução dos veículos flex-fuel, aliado ao aumento de percentual de álcool no combustível no mercado nacional e a crescente demanda mundial de combustíveis sustentáveis, tem incentivado grandes investimentos na produção da cultura da cana-de-açúcar. Para Inman-Bamber (1994) a cultura da cana-de açúcar tem chamado à atenção de vários pesquisadores no que diz respeito às relações hídricas.

Segundo Inman-Bamber (2005) a preocupação com a água para a irrigação é fator relevante em muitos países onde o seu abastecimento é limitado e as comunidades estão se tornando mais conscientes do impacto da irrigação sobre o meio ambiente e sobre a sustentabilidade dos seus meios de subsistência, particularmente nas zonas rurais. Em anos de

seca esta consciência é intensificada e a pressão sobre os produtores para melhorar as práticas de manejo da irrigação nas culturas (RODRIGUES et al., 2012).

Inman-Bamber (2005) ressalta que cerca de 60% da cana de açúcar produzida na Austrália e 40% na África do Sul recebem alguma forma de irrigação, em outros países esse percentual chega a 100%, como é o caso da Suazilândia e Sudão. A Austrália apresenta uma posição significativa no cenário mundial na irrigação de cana, ficando em oitavo lugar na produção de cana de açúcar.

O déficit hídrico no solo não é uma condição apenas de regiões áridas ou semiáridas no planeta e, mesmo em regiões com umidade e precipitação anuais compatíveis com as necessidades das culturas, o déficit pode interferir no crescimento com as irregularidades na distribuição em determinados estágios de desenvolvimento da cultura, para suprir a demanda mínima que garanta o funcionamento adequado de determinados processos morfofisiológicos (TAIZ; ZEIGER 2013; SMITH et al., 2005). Inman-Bamber e Smith (2005) relatam que a água apresenta-se como fator limitante na produção de cana de açúcar. Quando o recurso estando disponível para cultura, há aumento da capacidade de expressão do potencial produtivo das variedades, o que por sua vez favorece as tomadas de decisões nas escolhas das cultivares edafoclimaticamente adaptadas às regiões com menor disponibilidade de água.

Remesh (2000) destaca que a cultura apresenta fases críticas no que se refere ao déficit de água. Para a cana-de-açúcar os estágios vegetativos que mais são afetados por essa condição são: perfilhamento e crescimento dos colmos. Nesses estágios, mesmo uma pequena indisponibilidade de água no solo pode afetar tanto a divisão como o alongamento celular da cultura (INMAN-BAMBER 2005; RIBEIRO et al., 2013).

As condições de estresse hídrico na cultura interferem negativamente nos parâmetros relacionados ao metabolismo, fisiologia e morfologia das plantas, o que contribui para redução das taxa de fotossíntese e do desenvolvimento vegetativo (TAIZ; ZEIGER, 2013). O déficit hídrico apresenta efeito direto na enzima Ribulose 1,5 bifosfato carboxilase oxigenase (RUBISCO) e da fosfenol piruvato carboxilase (PEPcase), restringindo a fixação do CO₂ atmosférico, contribuindo assim para quedas no crescimento da cana-de-açúcar (TAIZ; ZEIGER, 2013). Trabalhos analisados na Austrália e no Brasil apontaram que as perdas nas taxa fotossintéticas da cana-de-açúcar chegaram a 35% (INMAN-BAMBER, 2005; RIBEIRO et al., 2013; MARCHIORI; MACHADO; RIBEIRO, 2014).

Diversos trabalhos apontam a influência da deficiência hídrica nas trocas gasosas sobre as culturas, em especial na cana-de-açúcar (ARIAS et al., 1996; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SMIT; SINGELS, 2006), milho (BERGONCI; PEREIRA, 2002; CRUZ, 2006), sorgo (NABLE; ROBERTSON; BERTHELSEN, 1999) e outras *Poáceas* C4 (GHANNOUM et al., 2003). Desta maneira, em condições de estresse hídrico as variáveis de trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta, de acordo com a espécie, tanto por limitações, como por exemplo, na realização de fotossíntese, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para assimilação, quanto por limitações metabólicas, pelo aumento do efeito fotoinibitório (GLAZ; MORRIS; DABOUB, 2004);

As plantas respondem ao déficit hídrico através de diferentes mecanismos que podem ser identificados através de medições instantâneas de trocas gasosas entre as plantas e a atmosfera, fazendo com que uma das primeiras respostas das plantas submetidas à deficiência hídrica seja o fechamento estomático, limitando a fixação de CO₂ (TAIZ; ZEIGER, 2013; BOARETTO; CARVALHO; BORG, 2014).

O conhecimento dos indicadores morfofisiológicos e das trocas gasosas relacionados ao cultivo em condições de estresse hídrico vem apresentando bons resultados quando se trata de metodologias utilizadas para o conhecimento de genótipos tolerantes às condições menos favoráveis aos cultivos nos programas de melhoramento genéticos de cana-de-açúcar (SILVA; COSTA; BANDARA 2011). Esse conhecimento das variedades de cana-de-açúcar comumente usadas e das novas variedades do setor sucroalcooleiro poderá ajudar a moldar um cenário com viabilidade econômica significativa, o que faz com que o setor seja mais atrativo para investidores uma vez que a cultura apresenta um acervo informações relacionadas ao manejo da planta (MCCORMICK; CRAMER; WATT, 2008).

2.5 Respostas da fotossíntese

A fotossíntese trata-se de uma reação de oxido-redução entre o CO₂ (agente oxidante) e a H₂O (agente redutor) onde os elétrons são transferidos contra um gradiente eletroquímico (TAIZ; ZEIGER 2013). A fotossíntese em planta C4 trata-se de um processo evolutivo extremamente complexo que evoluiu mais de cinquenta vezes em cerca de dezenove famílias de plantas vasculares tornando-se um dos mais convergentes fenômenos evolutivo já

conhecido pelo homem (MUHAIDAT; SAGE; DANGLER 2007; SAGE, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2013).

A fotossíntese na cultura da cana-de-açúcar teve seus primeiros registros por (HATCH; SLACK; JOHNSON 1967). Os pesquisadores observaram que os ácidos de quatro carbono, malato e aspartato eram os primeiros intermediários estáveis na fixação de CO_2 assim as plantas C4 apresentam estruturas especializadas anatomicamente e bioquimicamente que contribuem na concentração de CO_2 nos sítios da Rubisco. (VOZNESENSKAYA; FRANCESCHI; EDWARDS, 2004).

As plantas C4 fazem uso de forma mais eficiente da luz disponível no ambiente do que seus parentes as plantas C3, particularmente em altas condições de temperaturas. Isto faz com que as plantas C4 sejam bem sucedidas em ambiente com alta disponibilidade de luz. Em plena luz, as plantas C3 usam apenas uma fração da luz disponível no ambiente, a capacidade da planta para retirar CO_2 atmosférico e transforma-lo em carboidratos (KOTEYEVA; VOZNESENSKAYA; EDWARDS 2015).

As respostas fotossintéticas das plantas cultivadas a condições de luminosidade, concentrações de CO_2 atmosférico apresentam muitas variações entre plantas C3 e C4 cultivadas em condições idênticas, (KREBS; GOLEBIEWSKI; KANIA, 2007). Alguns estudos veem relatando medições fotossintéticas em cana-de-açúcar no Brasil e no mundo (LARCHER, 2003; INMAN-BAMBER; BONNETT; SPILLMAN 2008; NOSE; NAKAMA, 1990; VU; ALLEN Jr, 2009). Entretanto, comparando esses dados com os de outros estudos muitas vezes eles são limitados pelas condições de crescimento das culturas como local e forma de como as plantas estão sendo manejadas (GONÇALVES; FERREIRA; SILVA 2010).

2.6 Principais instrumentos para medição das trocas gasosas em ambiente de produção e científico

Os sistemas de análises de trocas gasosas são úteis para quantificar os efeitos das mudanças no ambiente de produção com a finalidade de observar a produtividade instantânea de uma planta (NORMAN; GARCIA; VERMA, 1992). Medir as trocas gasosas de uma planta inteira pode-se apresentar como uma tarefa extremamente complicada, no que diz respeito a modelar de forma precisa à distribuição da irradiação absorvida pelas plantas (BALDOCCHI et al., 1988).

Sistemas de trocas gasosas, quando devidamente projetados podem fornecer uma mediação do fluxo de CO_2 que se aproxima das condições naturais na qual a planta é submetida (VOURLITIS et al., 1993). As primeiras medições das trocas gasosas em plantas cultivadas ocorreram durante a primeira metade do século por um pesquisador chamado BOYSEN – JENSEN no ano de 1918, desde então o anseio pelo conhecimento do comportamento das plantas em ambientes de estresse aumenta dia após dia devido interesse de dominar as plantas cultivadas.

Em folha a fotossíntese é tipicamente medida avaliando a troca de vapor de água e CO_2 entre a folha e atmosfera (BEGUM et al., 2012). Tais medições nos dias atuais são realizadas utilizando dispositivos que auxilia nas medidas das trocas gasosas pelas plantas, tais como o dispositivo 6400 LI-COR fabricado por LI-COR (Lincoln, Nebraska EUA), LC-PRO por ADC ADC Bioscientific (Herts na Inglaterra), o CIRAS-2 por sistemas PP (Amesbury, MA US) e o modelo Walz GFS-3000 (H. Walz, Effeltrich, Alemanha).

Estas máquinas controlam com precisão a concentração de vapor de água e CO_2 em torno da folha. O fluxo de gases através da folha, a temperatura da folha, e o nível incidente de luz sobre a folha (LONG; WOOLHOUSE 1996). Este grau de controle permite a medição precisa das respostas a uma gama de parâmetros ambientais, mesmo em difíceis situações de campo. Vale salientar que dentre os modelos e marcas de analisadores de gases o modelo 6400 LI-COR fabricado em Nebraska – EUA é o aparelho mais usado por pesquisadores no mundo inteiro.

A taxa de fotossíntese é estimada como o CO_2 líquido como taxa de assimilação, que em um fluxo através do sistema é estimada como a diferença na concentração de CO_2 entre o ar que entra na câmara e o ar que fica na folha, a taxa de fluxo é dividido pela área foliar. Já taxa de transpiração é medida como a diferença de concentração do vapor de água entre a entrada e saída do ar da câmara multiplicado pela taxa de fluxo através da câmara, e o produto é dividido pela área foliar. Tanto transpiração e concentração de vapor de água nos espaços intercelulares da folha, é possível calcular a condutância foliar de vapor de água (LONG; WOOLHOUSE, 1996).

Condutância é o inverso da resistência à difusão da folha e o gás pode ser considerado um índice de abertura dos estômatos. Sabendo a condutância foliar, a taxa de transpiração, a taxa líquida de assimilação de CO_2 , o nível de CO_2 ambiente, o CO_2 intercelular, a eficiência da carboxilação, eficiência instantânea do uso da água, eficiência intrínseca do uso da água podem ser calculados (LONG; WOOLHOUSE 1996).

2.7 Produtividade da água (PA) e eficiência do uso da água (EUA)

Segundo Hsiao (2007) a produtividade da água é definida pela relação entre a produção biológica (matéria seca produzida) e a água consumida e não recuperável para essa produção, o processo é normalmente avaliado em termos de evapotranspiração (ET), a soma de transpiração pela cultura (T) e evaporação do solo (E). O autor avalia a produção de biomassa em relação à transpiração. Somente a água transpirada é considerada água útil porque a evaporação do solo não resulta na troca de carbono assimilado. A produtividade da água para biomassa (PAB) é definida como a matéria seca da parte aérea produzida (g ou kg) por unidade de água transpirada (mm ou m^{-3}). Quando se utiliza a irrigação por gotejamento, pode-se considerar que a evapotranspiração da planta é aproximadamente igual à transpiração da mesma, pois as perdas por evaporação são minimizadas.

A produtividade da água é definida na literatura de fisiologia vegetal com a denominação de eficiência do uso da água (EUA); esse termo é utilizado nos equipamentos analisadores de gases por infravermelho (IRGA) os quais apresentam os arquivos de saída com base nesta denominação. Segundo Monteith (1993) no termo eficiência do uso da água não há limites teóricos existentes como referência, como deve ser para eficiência no sentido de engenharia. Por outro lado, o termo eficiência é amplamente utilizado em economia sem se referir a um valor teórico máximo. No entanto o uso excessivo de EUA já causou certa confusão e encontrou objeções na comunidade científica, principalmente, porque o significado do termo depende das especificidades do numerador e do denominador que a definem. Portanto o termo Produtividade da água quanto eficiência do uso da água nesse contexto são similares e tanto podem usados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento apresentado nesta dissertação 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 - Temático) 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), Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP), Piracicaba - SP. As coordenadas geográficas do local são: 22° 43' 30" S de latitude, 47° 38' 00" W de longitude e 546 m de altitude, Figura 3.

Figura 3 – Localização de Piracicaba no estado de São Paulo (A); Local de instalação da estufa no Departamento de Engenharia de Biosistemas ESALQ/USP (B), casa de vegetação onde o projeto foi conduzido (C)

O experimento foi conduzido no 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, tendo cobertura plástica transparente (Ginegar Palstic Products® - Kibbutz Ginegar, Israel) e laterais fechadas com tela tipo “sombrite” preta, com 50% de interceptação da irradiação global Figura (4 A). A estrutura é provida de um total de 396 vasos em concreto armado (333 litros vaso⁻¹) Figura (4 B) assentados sobre base de concreto, além de uma estufa de apoio (110 m²), que foi utilizada para abrigar os quadros de comandos do sistema de irrigação, conjuntos moto-bombas, sistemas de aquisição de dados (dataloggers), servindo, também, de apoio na realização das análises de crescimento, preparo e armazenamento dos materiais coletados.

Figura 4 - Vista externa (a) e interna (b) da casa de vegetação

3.2 Caracterizações química e físico-hídrica dos solos

Os cultivos foram realizados em Latossolo vermelho amarelo (fase 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 m³), cultivados com duas mudas de cana-de-açúcar, Figura 5. Previamente ao ensaio, foram coletadas amostras deformadas para a realização de análises químicas e granulométricas, os resultados serviram para fins de recomendação (cálculo) de adubação e calagem.

Amostras indeformadas foram coletadas para a obtenção das curvas de retenção de água no solo (CRA's), através de mesa de tensão (-1, -2, -4 e -6 kPa) e extratores de “Richards” com placas porosas (-10, -30, -50, -100, -500, -1000 e -1500 kPa), bem como determinações da densidade (Ds), densidade das partículas (Dp) e porosidade total (PT) do solo Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização físico-hídrica do solo

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	0,227	0,106	24,2	1,53	2,65	42,3	75,1	7,8	17,1
0,20 - 0,40	0,226	0,098	25,6	1,50	2,65	43,4	74,5	8,0	17,5
0,40 - 0,60	0,241	0,132	21,8	1,69	2,64	36,0	74,4	8,6	17,0

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. Adaptado de Barbosa (2014)

Figura 5 - Detalhe das parcelas experimentais (6 parcelas os retângulos em azul representam as caixas onde a cultura foi instalada)

3.2.1 Caracterização da fertilidade do solo

A Tabela 3 apresenta as características da fertilidade do solo para macronutrientes no início do ciclo cana soca em cada variedade em relação às condições de manejo. A partir dessas informações as correções foram realizadas conforme a necessidade.

Tabela 3 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes no início do ciclo cana realizadas logo após o fim do ciclo cana planta (mês de março de 2014) para as oito variedades nas quatro lâminas de irrigação

Lâmina %	Variedade	Macronutrientes												
		pH	M.O	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Soma	CTC	Sat.	Sat.	S
		CaCl ₂		resina						bases		bases	Al	SO ₄
										S.B.				
		g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³					V%	m%	mg dm ⁻³
50%	1	5,2	18,3	28,8	0,5	21,3	4,5	25,0	0,0	26,5	51,5	51,3	0,0	33,3
	2	5,4	17,0	22,5	0,6	23,8	7,5	21,5	0,0	32,0	53,5	59,5	0,0	52,8
	3	5,2	17,5	24,0	0,4	22,0	5,8	23,8	0,0	28,3	52,0	54,0	0,0	34,8
	4	5,2	19,0	26,5	0,4	22,5	6,3	23,8	0,0	29,0	52,8	54,5	0,0	34,5
	5	5,2	17,0	22,0	0,9	22,3	7,0	23,8	0,0	30,3	54,0	55,5	0,0	39,0
	6	5,2	17,8	23,0	0,5	20,8	6,5	23,0	0,0	28,0	51,0	54,3	0,0	40,8
	7	5,1	20,0	28,5	0,5	21,3	5,3	25,0	0,0	27,5	52,5	51,5	0,0	32,5
	8	5,3	20,0	26,5	0,5	22,8	6,0	23,5	0,0	29,5	53,0	55,5	0,0	30,5
50 Total		5,2	18,3	25,2	0,5	22,1	6,1	23,7	0,0	28,9	52,5	54,5	0,0	37,3
75%	1	5,6	19,5	19,5	0,2	21,0	6,0	20,0	0,0	27,0	47,0	58,0	0,0	23,5
	2	5,6	17,0	19,0	0,3	23,5	7,0	19,0	0,0	30,5	49,5	61,5	0,0	44,0
	3	5,5	16,0	20,5	0,3	22,5	7,0	20,0	0,0	29,5	49,5	59,5	0,0	28,5
	4	5,6	16,0	20,5	0,3	22,5	6,5	20,0	0,0	29,0	49,0	59,5	0,0	27,0
	5	5,5	15,0	19,0	0,2	22,0	7,0	20,0	0,0	29,0	49,0	59,5	0,0	41,0
	6	5,6	15,0	22,0	0,3	24,0	7,0	19,0	0,0	31,0	50,0	62,5	0,0	25,5
	7	5,5	15,0	20,5	0,4	21,5	6,0	21,0	0,0	28,0	49,0	57,0	0,0	29,0
	8	5,7	18,0	21,5	0,4	24,5	7,5	19,0	0,0	32,5	51,5	63,0	0,0	13,5
75% Total		5,6	16,4	20,3	0,3	22,7	6,8	19,8	0,0	29,6	49,3	60,1	0,0	29,0
100%	1	5,6	18,6	21,8	0,4	23,8	5,6	19,2	0,0	30,0	49,2	60,8	0,0	43,2
	2	5,7	17,4	19,6	0,3	22,8	7,0	18,8	0,0	29,8	48,6	61,4	0,0	28,2
	3	5,6	18,8	21,6	0,3	23,2	6,4	19,2	0,0	30,0	49,2	60,8	0,0	35,6
	4	5,8	17,8	22,2	0,4	24,6	7,6	17,6	0,0	32,8	50,4	64,8	0,0	33,6
	5	5,5	17,4	19,6	0,3	21,4	7,2	20,6	0,0	28,8	49,4	58,4	0,0	33,0
	6	5,7	19,6	25,0	0,5	23,2	7,4	19,4	0,0	31,2	50,6	62,0	0,0	30,0
	7	5,6	20,2	21,8	0,6	24,6	8,6	19,6	0,0	34,0	53,6	63,0	0,0	52,6
	8	5,7	19,2	23,6	0,4	22,8	7,0	18,4	0,2	30,4	48,8	62,2	0,6	39,6
100% Total		5,7	18,6	21,9	0,4	23,3	7,1	19,1	0,0	30,9	50,0	61,7	0,1	37,0
125%	1	5,3	17,3	25,7	0,3	21,7	5,0	22,7	0,0	27,0	49,7	54,3	0,0	30,3
	2	5,3	14,7	22,0	0,3	22,0	5,3	22,3	0,0	27,7	50,0	55,0	0,0	44,3
	3	5,2	17,3	23,7	0,4	21,3	4,7	24,7	0,0	26,7	51,3	52,0	0,0	32,0
	4	5,3	17,3	25,0	0,4	22,0	5,0	22,3	0,0	27,7	50,0	55,0	0,0	35,7
	5	5,2	16,7	24,7	0,3	23,7	5,3	23,3	0,0	29,3	52,7	55,7	0,0	26,0
	6	5,3	17,3	25,0	0,3	23,0	5,0	22,0	0,0	28,3	50,3	56,0	0,0	37,0
	7	5,3	17,3	25,3	0,4	24,7	5,3	23,3	0,0	30,3	53,7	56,3	0,0	44,3
	8	5,1	16,7	24,0	0,5	21,7	7,0	23,3	0,0	29,3	52,7	55,7	0,0	57,7
125% Total		5,3	16,8	24,4	0,4	22,5	5,3	23,0	0,0	28,3	51,3	55,0	0,0	38,4
Total Geral		5,4	17,8	23,2	0,4	22,7	6,4	21,3	0,0	29,6	50,9	58,0	0,0	36,2

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)

A Tabela 4 apresenta as características de fertilidade do solo para micronutrientes no início do ciclo cana soca em cada variedade em relação às condições de manejo. A partir dessas informações as correções foram realizadas conforme a necessidade da cultura.

Tabela 4 – Resultado da análise química do solo para micronutrientes no início do ciclo cana realizadas logo após o fim do ciclo cana planta (mês de março de 2014) para as oito variedades nas quatro lâminas de irrigação

Lâmina %	Variedade	Micronutrientes				
		Cu	Fe	Zn	Mn	B
		DTPA		(água quente)		
		----- mg/dm³ -----				
50%	1	0,6	34,0	2,1	3,8	0,5
	2	0,6	34,2	2,2	4,1	0,5
	3	0,6	31,8	2,0	3,7	0,5
	4	0,6	62,0	1,9	3,4	0,4
	5	0,6	40,7	2,1	3,9	0,5
	6	0,6	43,8	1,9	3,7	0,4
	7	0,6	55,6	2,1	3,8	0,5
	8	0,6	39,2	2,0	4,0	0,4
50% Total		0,6	42,7	2,0	3,8	0,5
75%	1	0,6	26,8	1,9	3,1	0,5
	2	0,6	26,0	1,9	3,1	0,4
	3	0,6	26,8	2,0	3,4	0,5
	4	0,7	26,6	2,1	3,1	0,5
	5	0,6	40,8	1,9	3,1	0,5
	6	0,6	35,2	1,9	3,1	0,5
	7	0,6	35,6	2,2	3,7	0,5
	8	0,6	32,8	2,0	3,1	0,5
75% Total		0,6	31,3	2,0	3,2	0,5
100%	1	0,6	25,0	2,0	2,9	0,5
	2	0,5	33,6	1,6	2,6	0,5
	3	0,6	26,2	2,0	3,2	0,5
	4	0,5	24,5	1,7	2,7	0,5
	5	0,6	33,6	1,9	3,6	0,5
	6	0,6	25,4	3,1	3,4	0,5
	7	0,6	26,7	2,3	3,7	0,5
	8	0,6	27,9	2,0	3,2	0,4
100% Total		0,6	27,9	2,1	3,2	0,5
125%	1	0,6	29,6	2,0	4,1	0,5
	2	0,6	54,4	2,1	3,9	0,4
	3	0,7	31,5	2,1	4,2	0,4
	4	0,6	29,6	2,0	3,9	0,5
	5	0,6	29,9	2,0	4,3	0,5
	6	0,6	27,5	2,0	3,7	0,4
	7	0,6	28,8	2,1	4,4	0,5
	8	0,6	30,7	2,7	5,2	0,6
125% Total		0,6	32,7	2,1	4,2	0,5
Total Geral		0,6	33,6	2,1	3,6	0,5

Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B)

3.3 Monitoramentos climáticos

Os elementos climáticos foram monitorados no interior da casa de vegetação, foram monitorados a densidade de fluxo (W m^{-2}) da radiação solar global (R_g), através de piranômetro de fotodiodo de silício (LI200X - Campbell Sci.), da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA, $\lambda = 400\text{--}700\text{ nm}$), através de sensor quântico (LI190SB - Campbell Sci.) e da radiação líquida (R_n), através de saldo radiômetro (NRLITE - Campbell Sci.), assim como a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%), através de sensor Vaissala (HMP45C - Campbell Sci.). Os sensores foram instalados no vão central da casa de vegetação e acima do dossel da cultura, ligados aos dataloggers (CR1000 - Campbell Sci.), armazenando os dados em intervalos de 15 minutos (valores médios), Figura 6.

Figura 6 - Estação climatológica composta por sistema de aquisição de dados (A), sensores de captação de informações climatológicas (B)

3.4 Sistema de irrigação e automação

As irrigações foram efetuadas via gotejamento, com controle individual de cada parcela. Utilizando um sistema automático para aquisição de dados, usando transdutores de pressão acoplados aos tensiômetros, os mesmos foram ligados a um sistema de aquisição de dados composto por datalogger em comunicação direta com um computador. Os dados foram armazenados e ficava a disposição para manejar a irrigação em função de sua necessidade.

Com o intuito de controlar, individualmente cada parcela experimental, uma linha com cinco gotejadores (espaçamento de 20 cm entre emissores / vazão 1.6 litros/h) foi distribuída sobre cada um das 396 parcelas. A água para abastecimento destes gotejadores foi escoada via microtubo da estufa de apoio até a estufa de experimentação, sendo que cada microtubo era controlado por um micro registro plástico. De maneira a facilitar o controle de irrigação, todos os micros registros foram agrupados na estufa de apoio em um “main folder”, tendo o

pesquisador controle e visualização simultânea de todos os registros das 396 parcelas, Figura 7.

Figura 7 - Painel de controle irrigação (a), identificação das parcelas experimentais nos terminais dos microtubos

Além do sistema de irrigação por gotejamento, foi utilizado um sistema de irrigação secundário com microaspersão com o objetivo principal de aplicar defensivos agrícolas (inseticidas, acaricidas e fungicidas) quando necessário, assim como fertilizantes foliares que foram aplicados sob o dossel das plantas. O sistema de microaspersores foi usado como método de segurança no caso de possível perigo de incêndio dentro da estufa, uma vez que no interior da mesma existia uma série de sensores instalados juntamente com folhas secas da cana. Esta instalação deste sistema foi realizada por uma empresa terceirizada, em que estes distribuíram seis tubos de material PVC, nos quais foram inseridos microaspersores em posição invertida.

O monitoramento do potencial mátrico do solo foi realizado com de tensiômetros instalados imediatamente após o plantio das mudas nas repetições das oito variedades e em três profundidades: 0,10 m (representando a camada de 0,0 a 0,20 m), a 0,30 m (representando a camada de 0,20 a 0,40 m) e 0,50 m (representando a camada de 0,40 a 0,60 m).

O manejo da irrigação foi realizado por meio do monitoramento da tensão da água no solo, utilizando-se tensiômetros com transdutores de vácuo, instalados nas parcelas que receberão o nível de irrigação com 100 % da ETP, nas três profundidades mencionadas do tópico anterior (0,10; 0,30 e 0,50 m) os mesmos foram ligados a um sistema de aquisição de dados composto por datalogger em comunicação direta com um computador. Este manejo foi adotado como padrão, servindo como base para a aplicação dos demais níveis de irrigação (125, 75 e 50 %). Após as leituras de tensão, os valores coletados foram transformados em potencial matricial da água no solo (ψ_m), de acordo com a Equação 1.

$$\psi_m = L_t - h_c \quad (1)$$

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);

A estimativa da umidade (θ), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, é realizada através do modelo proposto por van Genuchten (1980) Equação 2, que relaciona os valores de Ψ_m com as respectivas θ . As lâminas de irrigação, para cada variedade, foram calculadas para elevar a umidade do solo à capacidade de campo (θ_{cc}) no tratamento T100 (100% da capacidade de campo). Na Tabela 5 podem-se observar com detalhes os valores de umidade assim como assim como os parâmetros empíricos usados no modelo de van Genuchten (1980).

Tabela 5 - 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)	$\theta_s(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_r(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\alpha \text{ (kPa}^{-1}\text{)}$	m	n
0,00-0,20	0,421	0,098	1,3464	0,1799	2,7175
0,20-0,40	0,412	0,085	1,5708	0,1648	2,5028
0,40-0,60	0,374	0,122	1,1291	0,2749	1,5619

Barbosa (2015)

$$\theta = \theta_r + ((\theta_s - \theta_r) / ([1 + (\alpha |\Psi_m|)^n]^m)) \quad (2)$$

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.

3.5 Seleções das mudas – UFSCAR / IAC E CTC

Para as mudas do projeto de pesquisa, foi necessário garantir a sanidade de origem do material, assim como, ter certeza de que o material genético selecionado é exatamente o que foi identificado nominalmente. Para evitar qualquer tipo de encontro, optou-se por coletar cada material de origem em seus programas originais de melhoramento genético no Brasil: CTC – Piracicaba, SP; RIDESA – Araras, SP e IAC – Ribeirão Preto, SP.

3.5.1 Condução das mudas

Após o plantio das gemas, 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. Toda 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 bandejas foram realizadas regularmente de modo a manter a umidade sempre próxima da capacidade de campo e favorecendo assim o pleno desenvolvimento das mudas.

O período de condução das mudas foi de 40 dias tendo sido necessárias pulverizações com inseticidas, em virtude da ocorrência de lepidópteras, e também adubações foliares. O monitoramento das plantas era realizado diariamente de modo a identificar possíveis problemas sanitários e nutricionais que pudessem, posteriormente, dificultar o estabelecimento e desenvolvimento na fase seguinte ao transplântio Figura 8.

Figura 8 - Plantio das gemas de cana de açúcar em bandejas (A), condução das mudas até transplântio (B)

3.5.2 Transplântio das Mudas Pré-Brotadas - MPB

O transplântio das mudas pré-brotadas foi feito quando estas se encontravam com altura média de cerca de 40 cm e número médio de cinco folhas; estes valores foram apenas referenciais, de modo que, em função da variabilidade destes dois parâmetros (comum a diferentes materiais genéticos) optou-se por adotar como indicativo no momento de transplântio o número de dias após o plantio da gema.

Figura 9 - Muda transplantada já em casa de vegetação definitiva até o fim do ciclo (A) e (B)

As mudas foram transplantadas nos 396 vasos de concreto armado com volume individual de $0,33 \text{ m}^3$, sendo transplantadas duas mudas por vaso. As covas que receberam as mudas foram feitas com o auxílio de trado do tipo holandês, com uma profundidade média de $0,15 \text{ m}$. As mudas foram transplantadas simetricamente nos vasos a uma distância entre elas de $0,5 \text{ m}$, mantendo ainda uma distância de $0,27 \text{ m}$ da lateral do vaso. Previamente ao transplante foi realizada seleção das mudas, de modo que, somente aquelas que se apresentavam mais uniformes foram efetivamente utilizadas na instalação do experimento Figura 9.

3.6 Tratamentos e delineamentos experimentais

Após o período inicial de adequação da estrutura física para o estudo e enchimento dos vasos com solo, montagem do sistema de irrigação, sistema de controle e automação, sistema de aquisição e armazenamento de dados, as variedades de cana-de-açúcar, na forma de mudas, foram distribuídas nas parcelas experimentais, de acordo com o croqui experimental Figura 11 onde permaneceram por dois ciclos, sendo eles cana planta primeiro ano 2013 e cana soca ano 2014.

Ciclo na planta - para este ciclo as trocas gasosas não foram realizadas e foi utilizado para calibração e treinamento com os aparelhos envolvidos na pesquisa sendo eles IRGA, câmera térmica e SunScan.

Ciclo cana soca – durante esse ciclo foi realizado dois experimentos, o primeiro chamado de **experimento 1** com o intuito de observar o comportamento de três das oito variedades estudadas sendo elas (V3, V4, V7) essas variedades foram escolhidas com base nas informações adquiridas no ciclo cana planta escolhendo as variedade mais discrepantes no que se refere a produtividade. Então foram estudadas 3 lâminas de irrigação (L50, L100 e L125) nas 3 variedades durante 30 dias, sendo que a primeira medida ocorreu 20 dias após a imposição dos tratamentos

O **experimento 2** foram estudadas 3 fontes de variação (FV), sendo: 4 épocas de amostragem ao longo do ciclo, 4 níveis de irrigação (L50, L75, L100 e L125) e 8 variedades de cana-de-açúcar chamadas de V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8, totalizando-se 128 tratamentos. O delineamento experimental foi em blocos inteiramente aleatorizados (DIA) em esquema de parcelas sub-sub-divididas (split-split-plot), com 3 blocos completos (1 por vão), totalizando-se assim, 384 parcelas experimentais, nos meses de abril, maio junho e agosto, no mês de julho não foram realizadas medidas em virtude de baixa temperatura e alta nebulosidade Figura 11.

Nesta pesquisa a época de amostragem para as trocas gasosas inicia-se aos 20 dias após a diferenciação dos níveis de irrigação, vale salientar que o experimento 1 e 2 ocorreram simultaneamente sendo que o experimento 1 teve duração de 30 dias e o Experimento 2 teve duração de 150 dias, e o ciclo da cana soca permaneceu 370 dias para as demais análises.

3.7 Determinações da área de análise das trocas gasosas

Para determinar qual seria a área que apresenta uma condição mais homogênea no interior da estufa, no que se refere à entrada de irradiação solar, utilizou-se o equipamento SunScan - Delta-T Devices Ltd modelo SS1-UM-2.0, que permitiu o mapeamento detalhado da irradiação em cima de cada vaso. As bordas da estufa podem apresentar alguns problemas como sombreamento nas suas extremidades (efeito do sombrite lateral) Figura (10 A).

Figura 10 - SunScam equipamento usado para monitoramento do comportamento da irradiação solar nas parcelas experimentais (A), mapa de irradiação dentro da estufa ($\mu\text{mol Fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e região escolhida para medições das trocas gasosas (B)

Figura 11 - Croqui do delineamento experimental

Com auxílio do SunScan - Delta-T Devices Ltd modelo SS1-UM-2.0 foi realizado o caminhamento dentro da estufa com equipamento o qual apresenta um conjunto de 64 sensores de irradiação, os mesmos realizam leituras apenas na irradiação no comprimento de onda de 400 a 700 nm (radiação PAR), sobre o dossel da cana-de-açúcar. Após a leitura os dados foram submetidos a análises utilizando o software R e o pacote geoR, com o intuito de caracterizar a área dentro da estufa cuja a irradiação apresentava a maior uniformidade na sua distribuição.

Verificou-se a dependência espacial com relação à distribuição da irradiação dentro da estufa e foi criado um mapa de distribuição da irradiação Figura (10 B), que auxiliou na tomada de decisão para escolher área dentro da estufa que apresentou a melhor uniformidade da distribuição da irradiação e assim possibilitou realizar as verificações das trocas gasosas. Vale salientar que esse procedimento foi adotado devido ao tamanho do experimento não permitir a realização das medidas em todas as unidades experimentais.

3.8 Tratos culturais

Os tratos culturais referentes à cultura, como o uso de inseticidas, fungicidas, acaricidas e demais produtos foram utilizados conforme a necessidade via sistema de microaspersão. Já o controle das plantas daninhas foi realizado de forma manual.

As adubações foram realizadas conforme necessidade via fertirrigação, assim como as adubações foliares, como base nas análises de solo e nas análises foliar.

3.9 Determinações da região da folha para análise

A luz solar incidente pode atingir a superfície foliar plena em diversos ângulos, dependendo do período do dia ou da orientação da folha. Quando a luz solar desvia da linha perpendicular em relação à superfície do limbo foliar, nessa condição a irradiância nessa condição é proporcional ao cosseno do ângulo em que os fótons atingem a folha (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A fim de determinar qual seria a região mais adequada da folha para análise das trocas gasosas, com o intuito de favorecendo a fotossíntese potencial foi utilizada imagens termográficas tiradas a quatro metros de altura do dossel das plantas com câmara térmica

(FLIR T640) Figura 12 e posterior análise destas imagens no software FLIR Tools, assim obteve-se a temperatura média do dossel vegetativo de cada variedade analisada. As imagens foram registradas quando as plantas estavam com aproximadamente dois meses no ciclo da cana soca. Essas imagens possibilitaram identificar qual região da folha apresentava maior e menor temperatura. E as folhas escolhidas para as análises foram às folhas que estavam posicionadas perpendiculares a irradiação, esse ângulo possibilitou melhores taxa de assimilação devido à exposição à densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativos.

Figura 12 - Câmera térmica FLIR T640 (A); Imagem termográfica (B)

3.10 Controles do ambiente com o Analisador de gases por infravermelho – IRGA

3.10.1 Controle de CO₂

O Sistema injetor de CO₂ 6400-01 consiste em um controlador eletrônico, um Conjunto de fonte de CO₂ que usa cartuchos prontamente disponíveis para operações portáteis e um encaixe para tanque de CO₂ para operações na estufa ou no laboratório. Todas as partes se integram diretamente ao console padrão, sem baterias externas ou módulos de controles.

O Sistema injetor de CO₂ fornece um fluxo constante de CO₂ de 50 a 2000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. O controle de CO₂ é realizado através do fornecimento de um fluxo precisamente controlado de CO₂ para o ar que é livre de CO₂. A concentração de CO₂ pode ser controlada na entrada do fluxo de ar ou na superfície da folha em até 1 ppm de um valor pretendido.

O 6400-01 facilita as medições em concentrações elevadas de CO₂ e a geração de curvas de resposta de CO₂. O injetor de CO₂ é completamente controlado por software, permitindo determinar manualmente níveis de CO₂ a partir do console ou use auto programas para realizar medições em uma série de concentrações. Os cartuchos de 12 g possibilitam até 8 horas de operação. Os cartuchos são acessíveis a partir do exterior do instrumento, tornando-os de fácil substituição.

3.10.2 Controle de H₂O

O LI-6400XT controla a umidade da câmara ao variar automaticamente a taxa de fluxo até o equilíbrio no nível de umidade da câmara que pode ser especificado no software; a taxa do fluxo de entrada também pode ser mantida constante. A taxa de fluxo é controlada pela velocidade de uma bomba no sistema padrão. Com o sistema injetor de CO₂ 6400-01, a velocidade da bomba é constante e a taxa de fluxo para a câmara é controlada pelo redirecionamento do fluxo em excesso. Essa “regulação em derivação” permite que o fluxo seja controlado com suavidade dentro de uma faixa ampla.

Independentemente da utilização do controlador 6400-01, o ar fornecido à câmara poderá ser seco ou úmido. O fornecimento de ar úmido à câmara permite o uso de taxas de fluxo mais elevadas para equilibrar baixas taxas de transpiração, o que proporciona um controle mais estável e medições mais exatas. As imprecisões e os retardos de tempo causados pela sorção de água nos tubos de ar entre o console e a cabeça sensora são eliminados pela medição das concentrações de referência e de amostras de vapor d’água na cabeça sensora.

3.10.3 Controle de temperatura

Dissipadores de calor Peltier integrados controlam a temperatura com base na temperatura da folha ou na temperatura do conjunto da câmara (que pode ser selecionada pelo software). A temperatura do conjunto da câmara pode ser configurada em qualquer valor dentro de ± 6 °C da temperatura ambiente. O controle de temperatura é um recurso padrão do LI-6400XT; não são necessárias fontes de alimentação ou acessórios externos.

3.10.4 Controle de luz

A Fonte luminosa de LED 6400-02B (02B* código usado para nomear a fonte luminosa), a Fonte luminosa vermelha, verde e azul (red, green, blue, RGB) 6400-18 e o Fluorômetro da câmara de folhas 6400-40 são integrados ao hardware e ao software do sistema LI-6400XT.

O uso de LEDs – Light Emitting Diode é prático, pois são fontes luminosas de pequeno tamanho e baixo consumo de energia. Os LEDs também minimizam a influência da fonte luminosa sobre a temperatura da folha e são facilmente controlados por computador.

A saída da Fonte luminosa e do Fluorômetro é continuamente variável em toda a faixa da medição. Assim, você pode especificar qualquer nível de luz sem precisar fazer ajustes ou

trocar filtros. Podem ser geradas curvas de luz automaticamente usando o auto programas e pontos de ajustes de luz selecionáveis.

3.11 Variáveis mensuradas nos experimentos (Relacionados ao IRGA)

Parâmetros fisiológicos: medidas ao longo do ciclo foram realizadas para determinação dos seguintes parâmetros: Temperatura foliar (câmera térmica FLIR E40), eficiência quântica potencial do fotossistema II, assim como as trocas gasosas (H_2O e CO_2), determinadas pelos analisadores de fotossíntese modelo LI-6400 XT (Licor, Lincoln NE, USA) Figura 13.

Figura 13 - Analisador de fotossíntese modelo LI-6400 XT (Licor, Lincoln NE, USA) (a), monitoramento das trocas gasosas em casa de vegetação (b), (c) e (d)

Durante o ciclo da cana soca as plantas foram monitoradas periodicamente. As medições das trocas gasosas foram realizadas entre os horários de 09h00min até 12:00 horas, quantificados na folha +1, a concentração de CO_2 no ar durante as medições foram fixados em $400 \pm 5 \mu mol^{-1}$ e a irradiação no interior da câmara fixada em $1000 \mu mol m^{-2} s^{-1}$.

Foram construídas curvas de luz com o intuito de observar a resposta da fotossíntese ao aumento da mesma, assim como as medidas pontuais das curvas de respostas ao aumento da luz as plantas passaram por período de aclimação por 5 minutos, para as curvas de luz fixou-se a concentração de CO_2 em $400 \pm 5 \mu mol^{-1}$ (o valor de $400 \pm 5 \mu mol^{-1}$ foi adotado

devido às condições de CO_2 estarem nesse patamar (LONG et al., 2004) e a luz foi de 800, 1000 e 1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Outras curvas de luz foram realizadas a fim de observar o comportamento das variedades, para obtenção da taxa de fotossíntese (A), da condutância estomática (gs), da transpiração (E) e da concentração interna de CO_2 (Ci) e da temperatura da folha. Foram calculadas também as seguintes relações: A/E (eficiência instantânea do uso de água), A/gs (eficiência intrínseca do uso de água) e A/Ci (eficiência instantânea de carboxilação).

3.11.1 Épocas das medidas (Relacionados ao IRGA)

Vale salientar que as medidas das trocas gasosas foram realizadas no ciclo cana soca. O ciclo cana planta foi usado para calibração, treinamento, verificação das potencialidades e limitações do uso do equipamento IRGA. Já no ciclo cana soca imediatamente ao corte da cana planta todas as plantas do experimento foram submetidas à lâmina de 100%, ou seja, todas as plantas estavam com disponibilidade hídrica na capacidade de campo e permaneceram nessa condição por aproximadamente 20 dias. Logo após as plantas foram submetidas às condições de manejo já citadas anteriormente.

3.12 Variáveis mensuradas nos experimentos (Relacionados à Biomassa)

A biomassa seca total da parte aérea das plantas foi obtida somando-se a matéria seca de todas as partes amostradas da planta durante a colheita e também dos limbos foliares secos coletados ao longo do experimento. Sendo assim, após a secagem do material em estufa de circulação ar forçada de marca TOLEDO, somou-se a matéria seca de perfilho improdutivo, limbo foliar total, bainha, desponte, e colmo de cada parcela.

3.13 Produtividade da água para biomassa - PAB (kg m^{-3})

Para calcular a produtividade da água para biomassa, foi necessário converter os dados de biomassa de gramas para quilogramas. De posse dos dados da biomassa convertidos, a PAB foi calculada pela Equação 19. Considerou-se que no sistema de gotejamento utilizado, que a evapotranspiração da planta foi igual a transpiração da planta (não houve perdas por evaporação).

$$PAB = \frac{\text{Biomassa}}{VT_{\text{Irrigação}}} \quad (3)$$

Em que:

PAB - produtividade da água para biomassa; em kg m^{-3} ;

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

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

3.14 Relação Produtividade da água estimada com o IRGA e Produtividade da água medida em experimento (Eficiência do uso da água)

Produtividade da água pra biomassa estimada – PABE com o IRGA e produtividade da água para biomassa medida no experimento ao longo de todo o ciclo de crescimento – PABM. Esses resultados foram obtidos dividindo a PABE pela PABM, assim o resultado apresentado trata-se de um fator, ou seja, um número que relata quantas vezes a PABE está sendo em relação à PABM nas oito variedades estudadas nas quatro lâminas de irrigação usadas no experimento.

$$\text{Fator} = \frac{\text{PABE}}{\text{PABM}} \quad (4)$$

Em que:

Fator - Relação Produtividade da água estimada com o IRGA e Produtividade da água medida em experimento;

PABE – Produtividade da água pra biomassa estimada com IRGA kg m^{-3} ; e

PABM – Produtividade da água biomassa medida no experimento ao longo do ciclo de crescimento kg m^{-3} .

3.15 Fixação de carbono

As estimativas para fixação de carbono na biomassa de cana-de-açúcar foram baseadas na produção de biomassa do colmo, bainhas, folhas, ponteiros e raiz. Hassuani; Leal; Macedo (2005); Campos (2003) salientam que para cada tonelada de biomassa produzida os valores de carbono fixados na biomassa são de 42 a 45%, isso para colmos, bainhas, folhas, ponteiros, perfilhos mortos e raízes. Campos (2003) em trabalhos realizados com cana-de-açúcar chegou ao valor de 42,86% de carbono e esse valor foi adotado para as estimativas da quantidade de carbono fixado na biomassa total e particionada da cana-de-açúcar.

3.16 Produtividade da água estimada para biomassa

A produtividade da água para biomassa estimada trata-se da conversação da fixação de CO_2 medido com o analisador de gases por infravermelho – IRGA pela transpiração da planta também medida com o IRGA, assim converteu-se $\mu\text{mol CO}_2$ para mol CO_2 multiplicado pela massa molar do CO_2 , assim tem-se g CO_2 . Já a transpiração no aparelho é dada por $\text{mmol H}_2\text{O}$, o que por sua vez foi convertido em $\text{mol H}_2\text{O}$ multiplicado pela massa molar de H_2O , chegando à unidade de $\text{g H}_2\text{O}$ transpirada, assim a produtividade da água ficou gamas de CO_2 por gramas de H_2O equação 4.

$$\text{PABE} = \frac{\text{CO}_2}{\text{H}_2\text{O}} \quad (4)$$

Em que:

PABE - produtividade da água para biomassa estimada; em kg m^{-3} ;

CO_2 – carbono fixado pela planta; em kg ; e

H_2O - volume total de água transpirada na parcela, em m^{-3} .

No entanto a unidade para produtividade de água é de $\text{kg H}_2\text{O m}^{-3}$, assim converteu-se g CO_2 para kg CO_2 e $\text{g H}_2\text{O}$ para m^{-3} considerando a densidade da água igual a 1. Estima-se que para cada unidade de carbono fixada na biomassa, 3,67 unidades de CO_2 são retiradas da atmosfera, ou seja, divide-se a massa de CO_2 por 3,67 pra chegar à unidade de carbono. Já para chegar à unidade de biomassa, sabe-se que na biomassa de cana-de-açúcar seca apresenta aproximadamente 42,86% de acordo com a massa de carbono (CAMPOS, 2003), então dividindo-se a massa de carbono por 42,86% obtêm-se a biomassa estimada para cada condição de manejo nas oito variedades estudadas.

3.17 Análise de resultados

Para os testes de médias dos resultados foi utilizado o software livre SISVAR versão 5.3 (FERREIRA, 2011). As variáveis que apresentaram valores de F significativo, no mínimo, a 5% de probabilidade na análise de variância foram submetidas ao teste de médias do tipo Scott Knott a um nível de 5% de probabilidade. Como o delineamento experimental é regido por um modelo estatístico (ou matemático) e para validar os testes de hipótese e inferências os modelos devem ter suas pressuposições atendidas (SILVA, 2007), foi avaliada a ocorrência de observações atípicas graficamente, com gráficos do tipo box-plot utilizando o software livre R, versão 3.0.1 como pacote GGLOT2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013). Para

análise descritiva multivariada foi utilizado o software Statistical Analysis System – SAS (SAS, 1992).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação das condições ambientais dentro da estufa nos dias de medições

Na Figura 13, observa-se a variação da temperatura do ar no interior da casa de vegetação onde foi conduzido o experimento; observa-se que os valores de temperatura mais altos foram registrados nos meses de abril, maio e agosto de 2014, quando a temperatura chegou a ultrapassar o valor de 38°C. Já para a época mais fria durante o período experimental, foi nos meses de junho e julho, os valores chegaram à temperatura de 6,7°C no mês de junho como pode ser visto na Figura (13 J). Vale salientar, que o mês de agosto foi o que apresentou a maior amplitude térmica, chegando a 24,88 °C em determinados dias do mês, além disso, o mesmo mês apresentou o maior número de dias com maior variação térmica entre as temperaturas diurnas e noturnas.

Wan et al. (1999) destaca que os eventos e a baixa temperatura no ano agrícola da cana-de-açúcar, principalmente na estação de inverno, como é o caso da região centro sul do Brasil, a redução acentuada na temperatura no ambiente pode provocar estresse a planta tão severo quanto a falta de água, em virtude de uma serie de reações que pode ser agravada pela redução na condutância estomática, na absorção e no transporte de água, o que consequentemente reduz a absorção de nutriente pela cultura. Vale salientar que a fotossíntese e o crescimento radicular são reduzidos assim como todos os demais processos vitais, até mesmo a inibição da atividade da Rubisco (ALLEN; ORT, 2001; WAN et al., 2004).

O CO₂ tende a entrar para o interior da folha, já a água tende a difundir-se para fora da folha através dos mecanismos de abertura e fechamento estomático. Mesmo sendo processos independentes, parte da água é perdida durante o processo da fotossíntese. Segundo Taiz e Zeiger (2013) a razão molar da perda de água e da absorção de CO₂ varia de 250 a 500, o que por sua vez essa transpiração elevada promove o esfriamento das folhas, mesmo nos dias com irradiação plena e valores de temperatura do ar maior. Dessa forma a observação de CO₂ nos dias que não apresentam nuvens e a temperatura do ar acima dos 25°C contribuem para melhor atividade fotossintética e principalmente quando a finalidade é mensurar as trocas gasosas nos ambientes de cultivos experimentais cuja as vereáveis podem ser controladas, ajudando assim nas tomadas de decisões a fim de entender a dinâmica do comportamento dos fatores inerentes à produção de biomassa que apresenta-se como um reflexo de como a planta responde ao ambiente (INMAN-BAMBER; LAKSHMANAN; PARK, 2012)

Shen et al. (2004) mencionam que a temperatura apresenta-se como um dos fatores que afeta diretamente na eficiência fotossintética da cana de açúcar, sendo que a temperatura

pode agir como um fator limitante dos processos fisiológicos na planta. (DU et al., 1999) ressalta que a taxa fotossintética da cana-de-açúcar a 10 °C tiveram uma redução de 20% quando comparada as plantas a 30 °C. Massad, Tuzet e Bethenod, (2007) observaram as taxas fotossintéticas do milho em seis temperaturas e notaram que as taxas fotossintéticas aumentaram a partir de 15 °C até a temperatura de 35 °C, e a partir desta, houve redução das taxas fotossintéticas, e assim como o milho, a cana de açúcar apresenta características muito semelhantes. Para Rodrigues (1995) em experimento realizado com cana-de-açúcar, o crescimento se torna lento a partir de 35 °C e nulo acima de 38 °C, o que implica que sua faixa ótima está entre 25 e 35°C. Taiz e Zeiger (2013) ressaltam que a temperatura até 40°C pode favorecer a fotossíntese líquida em algumas espécies de plantas C4 desde que as condições atmosféricas sejam normais, ou seja, o fluxo de CO₂ constante. Já com temperatura acima dos 40°C as reações bioquímicas da fotossíntese, bem como a integridade da membrana dos cloroplastos podem ser danificadas devido principalmente as reações enzimáticas.

Massad, Tuzet e Bethenod, (2007); Taiz e Zeiger (2013) destacam que as taxa máxima de assimilação de CO₂ para aumento da temperatura representam a resposta ótima a temperatura, isto é, a temperatura ótima é o ponto em que as capacidades de diferentes etapas da fotossíntese estão otimamente equilibradas.

Figura 14 - Variação da temperatura diurna durante os dias de análises das trocas gasosas. (A) variação da temperatura durante o dia, intervalo em que as coletas de dados foram realizadas, os pontos na cor vermelha representa (B), (C), (D), (E), (F), (G), (H) e (I), mostram o mesmo intervalo de horários em que as medições foram realizadas, as quais estão agrupadas na figura (L). Já a figura (J) a variação da temperatura máxima e mínima referente a trocas gasosas durante os meses de abril, maio, junho, julho e agosto de 2014

Na Figura 14 pode-se observar a variação da umidade relativa do ar nos meses de abril, maio, julho e agosto; as datas de leituras desses valores coincidem com as leituras das trocas gasosas. A cor vermelha dos pontos indica o intervalo em que os dados foram coletados destacados na Figura (14-A) que traz a indicação do intervalo estabelecido para coleta dos dados. A UR apresentou os menores valores observados no dia 01 de agosto com o valor de 27,34%, 03 de julho com 28,69% e 10 de agosto com 29,39%. Já as datas que apresentaram os maiores valores de UR durante o dia foram os dias 31 de julho com 91,1%, 15 de julho com 86,7%, 20 de maio com 85,7% e 16 de maio com 84%.

Figura 14 - Variação da umidade relativa do ar – UR diurna durante os dias de análises das trocas gasosas. A figura (A) ressaltava a variação da UR durante o dia, assim como, mostra o intervalo em que a UR encontrava-se no momento das coletas de dados; os pontos na cor vermelha mostram o intervalo de horários em que as medições foram realizadas, que também podem ser observados nas figuras (B), (C), (D), (E), (F), (G), (H) e (I)

4.2 Análises das Trocas gasosas com as variedades V3, V4 e V7 (experimento 1)

Vale salientar que os resultados das variedades V3, V4 e V7 foram obtidos com leituras pontuais dos dados em estufa, fixando-se a irradiação em $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e o fluxo de CO_2 400 ± 5 ppm, com as lâminas de irrigação L50 L100 e L125. A Figura 15 apresenta o comportamento da fotossíntese das três variedades de cana-de-açúcar analisadas no experimento 1. Observando de forma independente com a lâmina de L50 Figura (15-A), a variedade que apresentou os maiores valores de CO_2 fixados foi à variedade V3, seguida da variedade V7. Para a lâmina de L100, Figura (15-B), os maiores valores de assimilação de CO_2 encontrado foi na variedade V7 atingindo fixação de $22 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, seguida da variedade V3 com o valor de $21 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, já na lâmina de 125%, Figura (15-C) os valores de CO_2 fixados ficaram próximos de $11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ nas três variedades analisadas o que representa uma redução de 50% na fotossíntese. Nota-se que a mudança nos níveis de água no solo representados pelas lâminas alterou as respostas das plantas e provavelmente os mecanismos distintos de aclimação foram ativados já que a falta ou o excesso de água foram os percussores dessa resposta principalmente nesse estágio de desenvolvimento da cultura (KRAMER; BOYER, 1995; PARK; ROBERTSON; INMAN-BAMBER, 2005). O comportamento da baixa taxa de fotossíntese na lâmina de L125 para as três variedades foi similar à lâmina de L50.

Figura 15 – Fotossíntese (folha +1) para as variedades V3, V4 e V7 de cana-de-açúcar submetidas às lâminas de 50, 100 e 125 %, cultivadas em casa de vegetação a partir da imposição das lâminas de irrigação. As barras indicam o desvio padrão da média de 4 observações. (A), (B) e (C) variedade em função da lâmina de irrigação. A concentração de CO_2 no ar, durante as medições são fixados em $400 \pm 5 \mu\text{mol}$ e a irradiação foi fixada em $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Na Figura 16, observa-se o comportamento da taxa de fotossíntese das variedades V3, V4 e V7 em função das lâminas de irrigação. A lâmina que proporcionou melhor desempenho das variedades em relação à fixação de CO_2 foi à lâmina de 100% destacada na Figura 16, seguida da lâmina de 50% e os menores desempenhos das plantas foi com a lâmina de 125%. Para Taiz e Zeiger (2013) essas alterações podem ocorrer em função de algum estresse como déficit ou até mesmo excesso de água no ambiente, quando em déficit a planta usa a redução das atividades a fim de manter sua integridade estrutural e metabólica. Outras atividades na planta são diretamente alteradas como é caso da condutância estomática e transpiração (COSTA; MORENCO 2010)

Figura 16 - Fotossíntese (folha +1) das variedades V3, V4 e V7 de cana-de-açúcar submetidas às lâminas de 50, 100 e 125 %, cultivadas em casa de vegetação a partir da imposição das lâminas de irrigação. As barras indicam o desvio padrão da média de 4 observações. (a), (b) e (c) lâminas de irrigação em função da variedade. CO_2 e luz fixados em $400 \pm 5 \mu\text{mol}$ e $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

A condutância estomática pode ser observada na Figura 17 onde são apresentadas três lâminas de irrigação e três variedades de cana-de-açúcar. Na lâmina de 50% (Figura 17-A) as variedades que apresentaram maior condutância estomática foram a V7, V3 e V4 com os valores de $0,047$, $0,044$ e $0,039 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Já a lâmina 100 % (Figura 17-B) foi a que proporcionou maior abertura estomática entre as três lâminas usadas com destaque para variedade V3 que apresentou o valor mais elevado $0,0532 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Vale salientar que a variedade V7 na lâmina de 100% foi a que apresentou a maior variabilidade dos valores

observados, variando de 0,029 a 0,11 mol H₂O m⁻² s⁻¹, essa alta variabilidade pode estar relacionado com as características intrínsecas da própria variedade, uma vez que as demais variedades estavam submetidas às mesmas condições de ambiente e no entanto não apresentaram a mesma variabilidade. A lâmina de 125% (Figura 17-C) foi a que apresentou os menores valores de condutância estomática dentre as três variedades, com destaque para variedade V7, com valor de 0,032 mol H₂O m⁻² s⁻¹ e para a variedade V4, com o maior valor de 0,040 mol H₂O m⁻² s⁻¹. Entre as variedades há uma grande variação nas dimensões e frequência dos estômatos, o que tem grande importância nas diferenças de regulações das trocas gasosas (ANGELOCCI, 2002). Sendo assim as plantas podem apresentar ampla variação na condutância estomática devido à resposta precoce das alterações do ambiente (SMITH; SINGELS, 2006) o que pode justificar esse comportamento.

Figura 17 - Condutância estomática das variedades V3, V4 e V7 de cana-de-açúcar submetidas a 3 lâminas de irrigação e cultivadas em casa de vegetação. A concentração de CO₂ no ar, durante as medições foram fixados em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$ e a irradiação foi artificialmente fixada em $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

A Figura 18 apresenta o comportamento da transpiração nas variedades V3, V4 e V7 submetidas às lâminas de 50 100 e 125% respectivamente, na lâmina de 50% Figura (18-A) a variedade que apresentou maior valor de transpiração foi a variedade V7 chegando a média de $2,2 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, já a variedade V4 ficou na média de $1,7 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ seguida da variedade V3 que ficou na média de $1,85 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no entanto, essa variedade combinado com a lamina de 50% foi a que apresentou maior variabilidade nos dados de transpiração. Para a lâmina de 100%, a variedade que mais transpirou foi a V7 com média de $2,35 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ seguida da variedade V3 com $2,33 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no entanto a

variedade V7 apresentou maior variabilidade, como pode-se observar nos boxplots da (Figura 18-B), e a variedade V4 obteve o valor de $1,89 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Já na lâmina de 125% (Figura 18-C) as três variedades ficaram com valor de transpiração muito semelhante, sendo que a que mais transpirou foi à variedade V4, seguida da V7 e a que menos transpirou foi à variedade V3, com valores de 1,80, 1,48 e $1,39 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente.

Vale ressaltar que os valores encontrados na transpiração seguem notoriamente a resposta da condutância estomática visto na Figura 17. Ao se analisar as reduções na transpiração foliar de forma isolada observa-se o quanto as variedades podem apresentar respostas diferentes nas mesmas condições de manejo (BERGONCI; PEREIRA, 2002) já tinham observado tal comportamento em espécie de milho – *Zea mays* L. submetido às essas condições de déficit hídrico.

Figura 18 - Taxa transpiratória de três variedades de cana de açúcar submetidas a três lâminas de irrigação cultivadas em casa de vegetação. A concentração de CO_2 no ar, durante as medições foram fixados em $400 \pm 5 \mu\text{mol}^{-1}$ e a irradiação foi artificialmente fixada em $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. As lâminas aplicadas foram de 50%, lâmina de 100% e lâmina de 125%

Na Figura 19 são apresentados à relação entre a transpiração e a condutância estomática de três lâminas de irrigação nas três variedades de cana-de-açúcar. Vale ressaltar que para essa relação, independente da lâmina estudada a transpiração acompanhou o movimento da abertura e do fechamento estomático para das condições impostas.

Segundo Taiz e Zeiger (2013) isso ocorre pelo fato do vapor de água sair pelas fendas estomáticas, assim o movimento de água líquida que ocorre nos tecidos vegetais da folha é controlado por gradientes de potencial hídrico. Entretanto o movimento da água na fase de vapor é dada por difusão, assim a parte final da corrente transpiratória é controlada pelo

gradiente de concentração de vapor na atmosfera. Taiz e zeiger (2013) também salientam que uma das barreiras que impedem o movimento transpiratório é a cerosidade da cutícula que recobre a superfície da folha, o autor relata que aproximadamente 5% das perdas de água pelas folhas ocorrem pela cutícula, o restante, ou seja, 95% das perdas de água pelo ambiente é dada por difusão nas diminutas fendas estomáticas.

Lu e Zhang (1999) Ressalta que o estresse hídrico é responsável por diminuir a taxa transpiratória das folhas, devido a redução da condutância estomático, como consequência na planta há um aumento de temperatura foliar e redução na eficiência do fotossistema II, interferindo assim nos processos de transporte de elétrons e nas etapas de funcionamento da fotossíntese.

Figura 19 - Relação entre transpiração e condutância estomática das variedades V3, V4 e V7 para as lâminas de irrigação de 50,100 e 125 % com intervalo de confiança de 95%

A Tabela 6 apresenta a análise de variância por meio do teste de Scott-Knott (1974) com 5% de probabilidade para o fator lâmina de irrigação, onde houve efeito significativo nas taxas de fotossíntese, transpiração e condutância estomática. Para a fotossíntese a análise demonstrou que houve diferença significativa entre as três lâminas, já para a transpiração e condutância estomática houve diferenciação entre dois níveis de lâminas, a de 100% com maior fotossíntese e lâminas de 50 e 125% apresentando-se estatisticamente iguais.

Tabela 6 – Teste de médias para três lâminas de irrigação, analisando fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, transpiração $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e condutância estomática $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, teste realizado dentro das lâminas pelo teste de Scott-Knott (1974) com 5% de probabilidade

Lâmina	Fotossíntese	Transpiração	Condutância. Estomática
L50	12,35 b	1,57 b	0,03643 b
L100	19,46 a	2,12 a	0,0502 a
L125	10,94 c	1,45 b	0,0329 b

A Tabela 7 é apresentada os dados para os testes de médias das variedades V3, V4 e V7 para fotossíntese líquida, transpiração e condutância estomática. O teste mostra que para fotossíntese houve diferenciação em dois grupos variedades V3 e V7 apresentando-se iguais estatisticamente na assimilação de CO_2 , e a variedade V4 com menor assimilação. Já para transpiração e condutância estomática não houve diferença estatística entre as variedades V3, V4 e V7.

Tabela 7 – Teste de médias para três variedades de cana-de-açúcar, cultivada sob irrigação, fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, transpiração $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e condutância estomática $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, teste realizado dentro das lâminas pelo teste de Scott-Knott (1974) com 5% de probabilidade

Variedade	Fotossíntese	Transpiração	C. Estomática
V3	16.06 a	1.64 a	0.0408 a
V4	12.5 b	1.69 a	0.0385 a
V7	15.32 a	1.96 a	0.0433 a

A Tabela 8 apresenta o desdobramento das lâminas dentro das variedades. Nas três variedades estudadas a lâmina de 100% no (experimento 1) apresentou a maior assimilação de CO_2 , sendo diferente estatisticamente das demais lâminas. Analisando as variedades V3 e V4 as lâminas de 50 e 125% não apresentaram diferença significativa, já a variedade V7 diferenciou-se nas três lâminas na ordem de maior assimilação de CO_2 com a lâmina 100, 50 e 125% respectivamente.

Para condutância estomática a variedade V4 não apresentou diferença entre as lâminas impostas, já as variedades V3 e V7 houve diferenciação em dois níveis lâminas, a lâmina de 100% com os maiores valores de condutância estomática e as lâminas 50 e 125% estatisticamente iguais. Como a transpiração e a condutância estomática apresentam relação direta, o mesmo comportamento da transpiração pode ser observado na condutância estomática com as variedades V4 estatisticamente iguais para as três lâminas e as variedades

V3 e V7 diferenciando-se em dois níveis com maior transpiração na lâmina de 100% e as lâminas de 50 e 125% iguais estatisticamente a 5% de probabilidade.

Tabela 8 - Desdobramento das variedades dentro das lâminas e das lâminas dentro das variedades para análise da fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, condutância estomática $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e transpiração $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Desdobramento	Lâmina 50%	Lâmina 100%	Lâmina 125%
Variedade	Fotossíntese		
V3	12,47bA	20,33 aA	11,14 aB
V4	11,47 bA	15,08 aB	10,95 bA
V7	13,13 bA	22,09 aA	10,73 cA

Desdobramento	Lâmina 50%	Lâmina 100%	Lâmina 125%
Variedade	Condutância Estomática		
V3	0,0340 aB	0,0500 aB	0,0289 bB
V4	0,0357 aA	0,0367 aB	0,0430 aB
V7	0,0394 bA	0,0640 aA	0,0267 bA

Desdobramento	Lâmina 50%	Lâmina 100%	Lâmina 125%
Variedade	Transpiração		
V3	1,36 aB	2,01 aB	1,19 bB
V4	1,54 aA	1,66 aB	1,89 aA
V7	1,82 bA	2,78 aA	1,28 bB

Letras maiúsculas distintas indicam desdobramento das lâminas dentro das variedades e letras minúsculas distintas indicam desdobramento das variedades dentro das lâminas, a um nível de 5% de probabilidade pelo teste média múltipla Scott Knott

Nos desdobramentos das variedades dentro de cada lâmina para a taxa de fotossíntese, na lâmina 100%, as variedades V3 e V7 apresentaram-se iguais ao nível de 5% de probabilidade, diferenciando-se da variedade V4 que apresentou a menor taxa. Já nas lâminas de 50 e 125%, nas três variedades observadas, não houve diferença significativa entre elas.

A condutância estomática nas plantas cuja lâmina de irrigação foi 100 e 125% diferenciou-se em dois grupos, com maior valor para a variedade V7 sendo as variedades V3 e V4 apresentaram valores iguais estatisticamente; para a lâmina de 50% não houve diferença significativa entre as três variedades. Já o desdobramento para transpiração apresentou diferenciação em dois grupos nas três lâminas observadas, para a lâmina de 100% a variedade V7 foi a que mais transpirou, diferenciando-se das variedades V3 e V4, que foram iguais estatisticamente, o mesmo ocorreu com as lâminas de 125% e 50% que não apresentaram diferença significativa entre as variedades observadas.

Nas Figuras 20 e 21 observa-se o comportamento da eficiência do uso da água ($\mu\text{mol mmol}^{-1}$) de três variedades de cana-de-açúcar e três lâminas de irrigação, a Figura 20 (A, B e C) mostra como cada variedade se comportou em função das três lâminas. Nas três variedades observadas a lâmina de 100% foi a que apresentou melhor eficiência do uso da água, pode-se observar também que nas três variedades analisados os dados apresentam ampla variabilidade nos valores medidos. Já a lâmina de 125%, apresentou menor eficiência do uso da água até mesmo quando comparada com a lâmina de 50%, tal comportamento já tinha sido observado em outras variáveis como a taxa fotossintética, transpiração e condutância estomática para essa fase do experimento.

Na Figura 21 observa-se como cada variedade se comporta em termos de eficiência do uso da água EUA – $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}$ dentro de cada lâmina analisada. A variedade V3 foi a mais eficiente nas lâminas de 50 e 125%, já para a lâmina de 100% a variedade mais eficiente foi a V7 com valor médio superior as demais variedades estudadas.

Figura 20 - Eficiência do uso da água – EUA $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$ para cana-de-açúcar submetida a três lâminas de irrigação dentro de cada variedade

Figura 21 - Eficiência do uso da água em $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$ para três variedades de cana-de-açúcar dentro de cada lâmina de irrigação

A Tabela 9 observa-se a análise de variância para eficiência instantânea do uso da água em $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$ para cana-de-açúcar com nível de significância de 5% para o teste de Scott-Knott. Dentro das lâminas houve diferença estatística, diferenciando-se em dois grupos, as lâminas de 50 e 100% mais eficientes e iguais estatisticamente, e a lâmina de 125% menos eficiente no uso da água. Para a eficiência do uso da água entre as variedades, houve diferenciação em dois grupos, sendo a variedade V3 sendo a mais eficiente.

Tabela 9 - Teste de médias para três variedades de cana-de-açúcar, cultivada sob irrigação, para eficiência instantânea do uso da água – EUA $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$, teste realizado dentro das lâminas e das variedades pelo teste de Scott-Knott (1974) com 5% de probabilidade

Lâmina	EUA	Variedades	EUA
L50	9,14 a	V3	10,81 a
L100	10,38 a	V4	8,25 b
L125	8,27 b	V7	8,59 b

Como houve diferença estatística das lâminas e das variedades a Tabela 10 apresenta os desdobramentos para cada condição. A Tabela 8 apresenta o desdobramento das variedades dentro das lâminas, para a lâmina de não houve diferença entre as variedades, nas lâminas de 125% as variedades mais eficientes foram a V3 e V7, na lâmina de 50% a variedade mais eficiente foi a V3.

Para o desdobramento das lâminas dentro das variedades a V3 e V7 não apresentaram diferença nas três lâminas, já a variedade V4 houve diferenciação em dois grupos com a lâmina de 100% a mais eficiente.

Tabela 10 - Desdobramento das variedades dentro das lâminas e desdobramento das lâminas dentro das variedades para análise da eficiência instantânea do uso da água em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}$ pela cana de açúcar ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Desdobramento	Lâmina 50%	Lâmina 100%	Lâmina 125%
Variedade	Eficiência do uso da água		
V3	10,99 Aa	11,00 Aa	10,24 Aa
V4	8,16 Bb	10,61 Aa	5,99 Bb
V7	8,27 Ab	8,92 Aa	8,59 Aa

Letras maiúsculas distintas indicam desdobramento das lâminas dentro das variedades e letras minúsculas distintas indicam desdobramento das variedades dentro das lâminas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

Na Figura 22 (A, B e C) são apresentadas as relações entre a fotossíntese e transpiração para três lâminas de irrigação, com intervalo de confiança de 95%. Observa-se que a fotossíntese apresenta relação direta com a transpiração, ou seja, à medida que os valores de transpiração aumentam, observam-se maiores taxas de fotossíntese da cana-de-açúcar.

Figura 22 - Relação entre a fotossíntese e a transpiração das variedades V3, V4 e V7 simultaneamente, para as lâminas de irrigação de 50, 100 e 125%

4.3 Análises das trocas gasosas para as oito variedades (Experimento 2)

Na Figura 23 observa-se de forma resumida o comportamento da assimilação de ($\text{CO}_2 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), das oito variedades de cana-de-açúcar analisados em quatro lâminas de irrigação L50%, L75%, L100% e L125% e em três níveis de irradiação ou também chamado de densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativa – DFFFA 800, 1000 e 1500 $\mu\text{mol fótons m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Em termos médios para a DFFFA de 800 $\mu\text{mol fótons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ apresentou média de assimilação (desvio padrão*) de 12,05 (5,68*) na lâmina de 50%, 12,94 (4,97*) na lâmina de 75%, 15,67(4,95*) na lâmina de 100% e 16,71 (4,88*) $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ na lâmina de 125%. Para a DFFFA de 1000 $\mu\text{mol fótons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ os valores médios observados foram de 13,16 (7,01*) na lâmina de 50%, 14,69 (4,34*) na lâmina de 75%, 16,32 (4,76*) na lâmina de 100% e 16,54 (6,43*) $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para lâminas de 125%. Para a DFFFA de 1500 $\mu\text{mol fótons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ os valores de assimilação foram de 13,96 (6,71*) para lâmina de 50%, 15,59 (4,42*) para lâmina de 75%, 18,80 (6,76*) para lâmina de 100% e 19,66 (6,31*) $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para as lâminas de 125%. Vale salientar que os valores apresentados são médias das oito variedades para cada lâmina de irrigação com seus respectivos desvios padrão.

A fotossíntese líquida medida na Folha +1 das oito variedades de cana de açúcar submetidas às lâminas de irrigação de 50, 75, 100 e 125% em casa de vegetação, são apresentadas na Figura 24 (A, B, C, e D), mostrando de forma resumida o comportamento das variedades em função das lâminas impostas durante o experimento. Na lâmina de 50% a variedade que apresentou os maiores valores de fotossíntese líquida foi a variedade V7, seguida das variedades V5 e V4, vale salientar que essa condição de manejo com o maior nível de estresse foi a que apresentou a maior variabilidade entre as 4 condições de manejo, a exemplo observa-se que a variedade 5 na lâmina 50% (Figura 16 A) foi uma das variedades que mais assimilou CO₂, no entanto, a variabilidade entre repetições foi elevada como pode ser observado pelo box-plot correspondente.

Na lâmina de 75% (Figura 16 C) as variedades que mais se destacaram na taxa de fotossíntese foram às variedades V3, V4, V6 e V7, fixando aproximadamente 17 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Analisando a lâmina de 100% (Figura 16 C), a variedade V8 apresentou a maior assimilação de CO₂, seguida pelas variedades 2, 4 e 5, cujos valores variaram de 18,5 a 22,5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Já na lâmina de 125% (Figura 16 D), as maiores taxas de assimilação ocorreram nas variedades V3, V4, V5 e V8, com valores oscilando entre 19 e 21 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Assim como visto na Figura 24, o comportamento da assimilação de CO₂ na Tabela 11 apresenta os desdobramentos dentro de cada lâmina de irrigação e dentro de cada variedade com nível de significância de 5% de probabilidade através do teste de análise de variância de Calinski; Corsten. Vale salientar que com as lâminas de 50 e 100% foi possível identificar diferença estatística em até cinco grupos, já na lâmina de 75% não houve diferença significativa entre as variedades; já nos desdobramentos das lâminas foi possível identificar diferença estatística em até três grupos.

De maneira geral, analisando o conjunto de lâminas de irrigação aplicadas em função do conjunto de variedades, a lâmina de 50% apresentou redução na fotossíntese de 21,73% enquanto que a lâmina de 75% comparada com a de 100% apresentou redução de 12,08%, já a lâmina de 125% mais eficiente que a lâmina de 100% em 5,9%, vale ressaltar que essa estimativa foi realizada em função da lâmina na capacidade de campo sendo considerada a referência em disponibilidade água no solo.

Tabela 11 - Desdobramento das variedades e lâminas para análise da fotossíntese $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Calinski e Corsten

Variedades	Fotossíntese ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)			
	Lâmina 50%	Lâmina 75%	Lâmina 100%	Lâmina 125%
V1	11,93 dA	13,82 aA	15,7 dA	13,2 cA
V2	12,58 cB	10,50 aB	19,35 cA	17,73 bA
V3	8,41 eB	16,19 aA	19,01 cA	21,37 aA
V4	12,01 dB	12,26 aB	20,84 bA	19,51 bA
V5	13,89 bB	15,10 aB	18,22 cA	21,52 aA
V6	12,12 dA	16,94 aA	11,10 eA	15,21 cA
V7	20,56 aA	12,82 aB	9,31 eC	14,81 cB
V8	12,17 cB	11,05 aB	22,80 aA	19,76 bA

Lâminas identificadas com letras minúsculas significa desdobramento das lâminas dentro de cada variedade, e com letras maiúsculas distintas para mesma lâmina.

Figura 24 – Taxa de assimilação de CO_2 (Fotossíntese líquida) em oito variedades de cana-de-açúcar submetidas a quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100 e 125%, cultivadas em casa de vegetação. A concentração de CO_2 no ar, durante as medições foi fixada em $400 \pm 5 \mu\text{mol l}^{-1}$ e a irradiação foi mantida constante em $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

As taxas transpiratórias nas oito variedades de cana-de-açúcar irrigada são apresentadas na Figura 25, a lâmina que apresentou maior transpiração foi a de 100% com a variedade V8 chegando ao valor máximo de transpiração de $2,38 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e valor médio de $1,6 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, seguida das variedades V4 e V5 com 1,27 e $1,45 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectivamente. Na lâmina de 50%, as oito variedades apresentaram valores médios abaixo de $1,0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, já na lâmina de 75% observou-se valores muito semelhantes à lâmina de 50% com destaque para variedade V5, que apresentou valor acima de $1 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Foram analisadas as quatro lâminas independentemente os valores médios de transpiração foram: 0,71, 0,78, 1,06 e $1,14 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectivamente para as lâminas de 50, 75, 100 e 125%.

Figura 25 – Taxa transpiratória ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) nas oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento sob quatro lâminas de irrigação: 50, 75 100 e 125%

Nas avaliações realizadas entre às 09:00 e 12:30 horas, observa-se na Figura 26 o comportamento da condutância estomática para cada variedade em função do manejo de irrigação a qual cada variedade foi submetida. Para a lâmina de 50% a variedade que apresentou a menor condutância estomática foi à variedade V3 com valores fluando de $0,0013$ a $0,014 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e com valor médio de $0,0069 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, já a variedade V7 foi a que apresentou maior condutância estomática chegando a $0,032 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e média de $0,022 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Na lâmina de 75% as variedades que apresentaram maiores valores foram a 3, 4 e 6, e os e as menores condutâncias ficaram com as variedades V2 e V8.

A lâmina de 100% usada com lâmina de referência foi a que proporcionou as maiores condutâncias estomática com $0,03$ e $0,03 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectivamente e os menores valores de condutância desse tratamento ficaram com as variedades V6 e V7. Já para a lâmina

de 125% as variedades 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 apresentaram comportamento semelhante em valores de condutância, já a variedade 1 apresentou o menor valor da lâmina, vale salientar que a variedade os valores de condutância apresentaram-se similar nas lâminas de 50, 75 e 125%.

Figura 26 – Variação da condutância estomática mol H₂O m⁻² s⁻¹ em oito variedades de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, com quatro condições de manejo. Medições realizadas nos horários das 9 as 12:00 horas

Observa-se na Figura 27 o desempenho das oito variedades dentro de cada lâmina para condutância estomática; nota-se também de forma comparativa, a distribuição dos dados com densidade normal nas distribuições. Observa-se de forma geral que a menor lâmina (50 %) aplicada foi a que contribuiu para menor condutância estomática do conjunto de variedades, seguidas das lâminas de 75 e 100 e 125% com valores médios de 0,016, 0,018, 0,027 e 0,027 mol H₂O m⁻² s⁻¹ respectivamente. Em termos percentuais a lâmina de 50% apresentou redução de 39,16% da condutância estomática enquanto que a lâmina de 75% reduziu em 29,64% comparado com a lâmina de referência, na lâmina de 125% não houve nem redução nem ganho na condutância.

Estatisticamente as lâminas diferenciaram-se em grupos, sendo que as lâminas 50 e 75% diferem das demais, e as lâminas de 100 e 125% são iguais entre si a nível de 5% de significância.

Segundo Taiz e Zeiger (2013) o movimento de água da folha para atmosfera é governado por uma série de fatores, nesse caminho a água a partir do momento que ela entra

na planta é direcionada do xilema para as paredes celulares do mesofilo que por sua vez evapora para os espaços intercelulares das folhas. Sendo que o movimento da água pelos tecidos vivos das folhas é controlado por gradientes de potenciais hídricos, no entanto o movimento da água na forma de vapor é dado por difusão, então parte da saída de água da planta é controlada pelo gradiente de pressão de vapor de água.

Os valores de condutância podem sofrer ampla variação em função em função da abertura e do fechamento estomático, que por sua vez recebem influência direta de fatores como variedade usada, ambientes de produção, características morfológicas diferenciadas, como presença de cutícula mais ou menos espessa, temperatura do ambiente, umidade relativa do ar, irradiação solar, nível de CO₂ e principalmente pelas condições hídricas presente no solo (SILVA; COSTA, 2004).

Como observado na Figura 26 a condutância estomática apresentou os menores valores nas menores lâminas de irrigação aplicadas, isso está relacionado diretamente com a disponibilidade hídrica no solo. Nesse caso a imposição da restrição hídrica com lâmina de 50% afetou significativamente o nível de condutância estomática; a restrição hídrica na folha da cana-de-açúcar pode aumentar diretamente os níveis de ácido abscísico – ABA presentes nas células guarda, que possivelmente poderia reduzir a abertura estomática da cultura (TAIZ; ZEIGER, 2013) consequentemente com essa redução os níveis de transpiração e fotossíntese podem apresentar redução (INMAN–BAMBER; SMITH, 2005). Esse fenômeno de fechamento estomático em resposta às condições ambientais desfavoráveis, como neste caso, apresenta-se como um mecanismo de resistência à seca da planta em resposta à baixa disponibilidade hídrica no solo (INMAN–BAMBER; BONNETT; SPILLMAN, 2008).

Esse resultado corrobora com as informações adquiridas por (SMITH; SINGELS, 2006) que também notaram redução na condutância estomática em variedade de cana-de-açúcar, apresentando sensibilidade à redução de água disponível no solo, no entanto, o autor ressalta que essa redução varia significativamente em função da variedade adotada, comportamento este que pode ser observado na Figura 27. (BERGONCI; PEREIRA, 2002; GONÇALVES; FERREIRA; SILVA, 2010)

Figura 27 – Variação da condutância estomática $\text{mol (H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})$ em relação às lâminas usadas em oito variedades de cana-de-açúcar. Cada lâmina possui informações das oito variedades. Gráfico de violino ou Violin-plot

4.4 Eficiência do Uso da Água – EUA e Eficiência intrínseca do Uso da Água EiUA

As concentrações intercelulares de CO_2 são regidas pelos processos da fotossíntese, ou seja, pela assimilação de CO_2 da atmosfera, pela respiração celular, fotorrespiração e pelo influxo de CO_2 do ambiente para o meio interno para câmara subestomática através da abertura estomática e o gradiente de pressão externo. Reduções moderadas na condutância estomática limitam significativamente as perdas de água na forma de vapor do que a entrada de CO_2 na câmara subestomática através dos fatores físicos como, por exemplo: maior taxa de difusão e maior diferença na concentração de vapor da água que no CO_2 e nos fatores biofísicos como redução das rotas de saída de água através das folhas assim quanto maior o caminho para entrada de CO_2 até os sítios de carboxilação (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Na irradiação de $1000 \mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a relação feita entre a fotossíntese e a transpiração na média das oito variedades apresentaram os seguintes valores 23,95 na lâmina de 50%, 21,28 na lâmina de 75%, 18,80 na lâmina de 100% e 17,83 $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$ para a lâmina 125% respectivamente. Na lâmina de 50% as variedades que foram mais eficientes foram V7, V4 e V5 com os valores de 25,69, 22,56 e 22,26 $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$ respectivamente. Vale salientar que nessas condições de manejo os tratamentos com as lâminas as 50 e 75% apresentaram melhor eficiência instantânea no uso da água. As plantas usam estratégias para evitar a desidratação excessiva devido à transpiração pelas folhas, para isso o fechamento estomático, fisiologicamente essa resposta pode ser identificada como redução na condutância estomática (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A redução da condutância estomática implica em redução da assimilação de CO_2 , ou seja, ocorre a inibição da difusão do CO_2 nas folhas. No entanto a planta ainda permaneceu

assimilando CO_2 com baixa condutância estomática, essa condição pode tornar a planta mais eficiente em termos instantâneos foi pode ser observado na eficiência instantânea do uso da água, ou seja, a relação feita entre a assimilação de CO_2 dividido pela baixa transpiração promoveu melhores resultados nas lâminas de 50 e 75%. O mesmo comportamento ocorreu para a eficiência intrínseca do uso da água, já que nesse caso a relação é feita entre a fotossíntese à condutância estomática.

Já na eficiência intrínseca do uso da água (EiUA) trata-se da relação direta da assimilação de CO_2 pela condutância estomática. Os dados mostram que a lâmina que apresenta o maior valor de EiUA foi com a lâmina de 50% com $1050 \mu\text{mol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$ e o menor valor da EiUA foi com a lâmina de 125% com $820 \mu\text{mol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$. Observa-se também que na lâmina de 50% os dados apresentam maior variabilidade em relação às outras lâminas como foi ser visto nos boxplots EiUA na Figura 28.

Figura 28 – Variação da eficiência do uso da água – EUA (Fotossíntese / Transpiração $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$) e eficiência intrínseca do uso da água - EiUA (Fotossíntese / Condutância estomática $\mu\text{mol CO}_2 / \text{mol H}_2\text{O}$) em oito variedades de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, com quatro condições de manejo. Medições realizadas nos horários das 9 às 12:00 horas

A Figura 29 apresenta o resultado à eficiência da carboxilação da fotossíntese para oito variedades de cana-de-açúcar submetidas a lâminas de irrigação os maiores valores da eficiência foram observados nas lâminas de 100 e 125% com valores de 0,021 e 0,019

A resistência à difusão de CO_2 é impulsionada por um gradiente entre a fração foliar molar do CO_2 no ar em relação aos sítios ativos da Rubisco nos cloroplastos. O CO_2 difunde-se através dos estômatos nos espaços intercelulares presentes no mesofilo das folhas, em seguida o CO_2 atravessa a parede celular e a plasmalema e a membrana dos cloroplastos e finalmente alcança os cloroplastos, cada um desses passos representa uma resistência física para difusão de CO_2 que reduz de forma progressiva a fração molar do CO_2 .

Figura 29 – Eficiência instantânea da carboxilação – A.Ci (Fotossíntese / concentração interna de CO_2) analisados nas oito variedades de cana-de-açúcar e nas quatro lâminas de irrigação, Sendo analisados nas folhas + 1 de cada variedade nas quatro lâminas de irrigação sendo elas 50, 75, 100 e 125% nas figuras A, B, C e D respectivamente

4.5 Respostas fotossintéticas ao aumento da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativo - DFFFA

Na Figura 30 observam-se as curvas de resposta na fixação de CO_2 pelas oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas submetidas às DFFFA de 50, 100, 1000, 2000, 2500,

3000 e 4000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As variedades que apresentaram saturação por luz foram as variedades 4 e 5, com 28,36 e 27,87 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ assimilados respectivamente (nível de significância 5 %), já as demais variedades não apresentaram saturação de fotossíntese na faixa de irradiação analisada. A variedade V6 foi a que apresentou a menor taxa de assimilação de CO_2 das oito variedades analisados com valor de assimilação de 18,47 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Deve-se salientar que as variedades V4, V5 e V6 apresentam características distintas das demais, pois após alcançarem o ponto de saturação por irradiação, apresentam uma redução brusca na taxa de fixação de CO_2 , chegando a valores negativos, como se pode observar nas Figuras 30 D, 30 E e 30 F.

Pelo fato da irradiação tratar-se de um recurso muito importante para a produtividade da cana-de-açúcar, seu excesso ou falta pode causar interferências negativa no desenvolvimento da cultura. Ao atingir o ponto de saturação por irradiação, pelo fato de se manter a respiração mitocondrial nas células, a absorção de CO_2 pode atingir valores negativos (SMITH, 2004). Como se observa neste experimento nas setas indicativas nas Figuras 30 D, 30 E e 30 F.

O ponto de compensação varia com temperatura no momento da medição e com a concentração de CO_2 . Já em fluxo fotônicos elevados as respostas à fixação de CO_2 estabilizam-se alcançando o ponto de saturação. O aumento da irradiação acima do ponto de compensação, pode indicar que fotossíntese é limitada pela taxa de transporte de elétrons, o que por sua vez é restringida pela quantidade de luz presente no ambiente. Outros mecanismos podem influenciar positivamente na limitação da fotossíntese como é o caso da capacidade de carboxilação da Rubisco e do metabolismo das trioses-fosfato (TAIZ; ZEIGAR, 2013).

Figura 30 – Resposta da assimilação de CO_2 (fotossíntese líquida $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ao aumento da densidade do fluxo de fótons fotossinteticamente ativa $\mu\text{mol Fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em oito variedades de cana-de-açúcar irrigada, 30 dias após as lâminas serem impostas, sendo analisados nas folhas + 1 de cada variedade, ^{ns} não significativo ao nível de 5% de probabilidade, * significativo ao nível de 5%

As Figuras (31A, 31B, 31C, 31D, 31E, 31F, 31G e 31H) expressam o comportamento da temperatura do ar no momento de medição das curvas de irradiação, assim como, o comportamento da temperatura foliar no mesmo instante. Dentre as oito variedades analisadas, a que apresentou menor temperatura do ar no momento das leituras foi à variedade V1, com valores oscilando entre 27,6 e 29,9 °C. Já a variedade que apresentou o maior incremento na temperatura foliar foi à variedade V5, com valores oscilando entre 33,95 a 40 °C, sendo que a temperatura do ar permaneceu constante na faixa dos 36 °C durante este mesmo período.

A temperatura foliar apresenta-se como uma resposta da planta às condições ambientais. Como a irradiação emitida sob o limbo foliar aumentou gradativamente, a temperatura foliar também apresentou o mesmo comportamento, em função do aumento da irradiação incidida, como consequência a taxa fotossintética aumentou inicialmente em resposta a este aumento de temperatura, pois a temperatura inicial foliar era menor do que a temperatura ótima para o processo de fotossíntese (INMAN-BAMBER, 2012). Taiz e Zaiger (2013) ressaltam que esse é um dos fatores ambientais que contribui para o aumento da

fotossíntese, no entanto existe um limite superior quando a temperatura ultrapassa níveis ótimos de temperatura e passa a ser um fator limitante.

Smith (2004) salienta que esse aumento da temperatura contribui para alterações fotossintéticas considerando que as concentrações de CO₂ atmosférico mantenham-se em níveis normais. A ascensão da curva da temperatura foliar contribui para estimulação da atividade enzimática, o que por sua vez auxilia para atingir a temperatura ótima de fotossíntese.

Figura 31– Resposta da temperatura do ar e da folha °C analisados simultaneamente as curvas de assimilação de CO₂ nas oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas

4.5 Análise descritiva multivariada – Análise de componentes principais – ACP

Análise de componentes principais – ACP ou PCA do inglês Principal Component Analysis são análises realizadas com o intuito de facilitar visualizações de conjuntos de dados. Utilizando critério de Kaiser (o critério de Kaiser verifica quantos dos autovalores são ≥ 1) foi verificado que dois componentes principais são suficientes para explicar os dados, totalizando 88,59% da variabilidade encontrada. De acordo com a Tabela 13, utilizando um nível de corte igual a 85% a variável concentração intercelular de CO₂ apresentou um peso insignificante quando comparado com as demais variáveis, dessa forma o primeiro componente principal é formado por fotossíntese, condutância estomática e transpiração.

Da mesma forma pode-se observar que a única variável significativa no componente dois é a concentração intercelular de CO_2 . Os componentes principais três e quatro não são pertinentes a análises uma vez que o critério os excluiu.

Tabela 12 – Análise de variabilidade explicada pelos componentes principais

Componente	Autovalor	Proporção	Proporção acumulada
1	2,5300	0,6335	0,6330
2	1,0000	0,2524	0,8859
3	0,3050	0,0765	0,9623
4	0,1500	0,0377	1,0000

Tabela 13 – Determinação dos pesos das variáveis em cada componente principal - PCR para as variáveis: fotossíntese, condutância estomática, concentração intercelular de CO_2 – Ci e transpiração

Variável	(PCR 1)	(PCR 2)	(PCR 3)	(PCR 4)
Fotossíntese	0,8915	0,0736	-0,4379	-0,0901
Condutância Estomática	0,9209	-0,0076	0,3193	-0,2236
Ci	0,0246	0,9982	0,0437	0,0317
Transpiração	0,9437	-0,0882	0,101	0,3025

O Biplot apresenta-se como uma ferramenta de análise multivariada para análise descritiva, pois a partir dele é possível diagnosticar uma gama de informações úteis no experimento como por exemplo: na Figura 32 pode-se verificar a presença de três grupos com relação ao componente dois, isto é, com relação a concentração intercelular de CO_2 . O primeiro grupo apresenta um valor elevado, acima de um; o segundo apresenta um valor intermediário próximo à média zero e o terceiro grupo, um valor baixo de aproximadamente menos um.

Quanto menos correlacionadas duas variáveis são, mais o ângulo entre os eixos que as representam aproxima-se de 90° , ou seja, observando-se os eixos de fotossíntese e concentração intercelular de CO_2 verifica-se que as mesmas não são correlacionadas, já a condutância estomática e transpiração apresenta uma correlação positiva, isto é, quando uma das variáveis aumenta a outra tende a aumentar bem como condutância estomática e fotossíntese.

Projetando os pontos nos eixos pode-se determinar se estes apresentam um valor auto ou baixo com relação à determinada variável. Pode-se ver na Figura 32 que alguns pontos do grupo dois estão em cima do eixo da transpiração no sentido crescente, logo apresentam um valor elevado dessa variável, em contrapartida os pontos mais a esquerda do grupo três apresentam um valor baixo de fotossíntese, pois quando projetados nessa variável eles encontram-se na região inferior esquerda da figura, que representam valores altos, porém negativos para variável fotossíntese.

Dividindo o Biplot em quatro quadrantes centrados na origem tem-se que: pontos localizados no quadrante superior direito apresentam valores elevados dos componentes um e dois, ou seja, valores elevados de todas quatro variáveis; pontos localizados no quadrante superior esquerdo apresentam valores elevados do componente dois e valores baixos do componente um, ou seja, alto valor da concentração intercelular de CO_2 e baixos valores das demais variáveis; os pontos localizados no quadrante inferior esquerdo apresentam valores baixos de todas as variáveis por fim pontos localizados no quadrante inferior direito apresentam baixo valor da concentração intercelular de CO_2 e alto valor das demais variáveis.

Entretanto em todas as classificações explicadas nos parágrafos supracitados, verifica-se a presença de todos os fatores estudados, lâmina de irrigação, variedades e irradiação de forma aleatória.

Figura 32 – Biplot dos principais parâmetros fisiológicos na cultura da cana-de-açúcar

4.6 Produção de biomassa de cana-de-açúcar

A biomassa total expressa na Figura 33 (A, B, C, D) foi obtida no experimento da cana planta, plantada do ano de 2013 e Figura 33 (E, F, G, H) representa o ciclo cana soca ano 2014.

Vale salientar que no ciclo da cana planta, o manejo da lâmina de 125% foi diferenciado, ou seja, a lâmina começou com 125% até meados de agosto, e após foi reduzida gradativamente até que o volume de água aplicado na cultura fosse igual ao volume aplicado na lâmina de 75% nos dois anos de cultivos. Sendo assim o experimento apresentou duas lâminas 75% com o mesmo volume de água requerido, no entanto, com manejos diferenciados: uma com aplicação contínua e outra com aplicação variável. Vale ressaltar que os dados da biomassa mensurados foram obtidos usando toda parte área da planta sendo elas: colmos, bainhas, folhas, ponteiros exceto as raízes, para isso adotado para isso, adotou-se a

biomassa do sistema radicular como 22,0% da biomassa total da planta (FARIAS et al., 2008), ou seja, acrescentou-se 28,0 % na biomassa da parte aérea para estimativa da biomassa total produzida (aérea e subterrânea).

Dentre os manejos adotados a lâmina de 100% foi a que apresentou os maiores valores para produção de biomassa, com destaque para as variedades V1, V2, e V4 que apresentaram, na qual a variedade V1 acumulou 5,970 kg de biomassa por parcelas (2 touceiras). Já para a condição de manejo usando a lâmina de 50% a variedade V1 assim como na lâmina de 100% foi a que mais se destacou chegando a 3,131 kg por parcela, ou seja, houve redução de 50% da lâmina aplicada o que proporcionou redução de 39,75% na produção de biomassa; as variedades V2 e V4 apresentaram-se estatisticamente igual com nível de significância de 5%.

Já no ciclo da cana soca Figura 32 (E, F, G, H) na lâmina de 50%, a variedade que obteve o menor valor de biomassa por parcela foi à variedade V7 com 2,661 kg e a variedade que obteve o maior ganho de biomassa para pra essa condição de manejo foi a V3 com valor de 4,753 kg. No manejo da irrigação com a lâmina de 100% assim como na lâmina de 50% a V3 foi a que produziu a maior quantidade de biomassa chegando a 7,424 kg, ou seja, na lâmina de 50% a quebra no peso chegou a 35,98% em relação à de 100%.

Figura 33 – Desdobramento dos valores de biomassa total da parte aérea por parcela (duas touceiras) em kg para as oito variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina (Figura A, B, C e D) referem-se a ciclo da cana planta Dados de (Barbosa, 2015). Já as (Figuras E, F, G e H) referem-se ao ciclo da cana soca * 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 Knot

A Figura 34 apresenta os resultados do ganho de biomassa das oito variedades de cana-de-açúcar estudadas no ciclo cana planta pra as quatro lâminas de irrigação adotadas. Foi observado que independente da variedade na lâmina de 50% foi encontrado o menor valor de biomassa total em quilogramas por parcelas de 2,629 kg, já a lâmina de 100% apresentou o maior peso da biomassa por parcela e ficou com valor de 4,853 kg o que corresponde a uma redução de 45,6% da lâmina de 50% em relação à de 100%. Já os manejos com as lâminas de 75 e 125% apresentaram comportamento similar com valores de produção de biomassa de 3,846 e 3,591 kg respectivamente, o que representa uma redução de 20,6 e 26% em relação à lâmina 100%. Vale ressaltar que esses valores observados na produção de biomassa na lâmina de 125% o volume de água aplicado foi similar à lâmina de 75%.

Figura 34 – Análise de variância para produção de biomassa da parte aérea – kg para o conjunto das oito variedades de cana-de-açúcar nas lâminas de irrigação de 50, 75, 100, e 125% no ciclo da cana planta

Para o ciclo da cana soca a produção de biomassa total para cada manejo de irrigação independente da variedade é apresentado na Figura 35, das quatro lâminas de irrigação adotadas a que apresentou o maior incremento de biomassa foi à lâmina de 100%, seguida das lâminas 75, 125 e 50% que a apresentaram a menor contribuição de biomassa por lâmina com valores de 5,712, 5,271, 4,501 e 3,804 kg por parcela. A lâmina de 50% correlacionada com a de 100% apresentou redução de 33,4%, já a lâmina de 75% com a de 100% apresentou redução de 7,7% na biomassa total. Vale salientar que em todas as condições de manejo a produção de biomassa total foi maior com ciclo cana soca comparados com o ciclo cana planta.

Figura 35 – Análise de variância para produção de biomassa da parte área - kg para o conjunto das oito variedades de cana-de-açúcar nas lâminas de irrigação de 50, 75, 100, e 125% no ciclo da cana soca

Na Figura 36 observa-se o resumo da produção de biomassa por hectare para as 4 lâminas de irrigação adotadas no experimento, outra informação observada nesta Figura é a quantidade de carbono fixado na matéria seca - MS, levando em consideração que os valores observados foram calculados com o percentual de carbono de 42,86% em relação MS (CAMPOS, 2003), vale salientar que essa matéria seca total ou seja, a somatória dos pesos dos ponteiros, bainhas, folhas, colmos, raízes e perfilhos mortos. A área ocupada por parcela (duas plantas) foi de $0,62 \text{ m}^{-2}$.

A Figura 36 apresenta a estimativa da produção de biomassa por hectare baseado nos valores de biomassa das parcelas no ciclo cana planta e cana soca. Os valores observados são: 42,410, 57,350, 71,530 e 58,640 t ha^{-1} para as lâminas de 50, 75, 100 e 125% respectivamente para cana planta. No ciclo cana soca houve evolução na produção de biomassa em todas as lâminas comparadas com as lâminas do ciclo cana planta. Os valores observados são de 92,14 t ha^{-1} na lâmina de 100% e de 61,37 t ha^{-1} para lâmina de 50%, o que representa uma redução de 40,70%.

Figura 36 – Total de biomassa de cana de açúcar em toneladas por hectare e total de biomassa em toneladas produzido por hectare nas quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100 e 125%* independente da variedade para o ciclo cana planta e cana soca

Na Figura 37 observa-se a estimativa para a produção de biomassa das variedades dentro de cada lâmina de irrigação no ciclo da cana soca com desataque para as variedades V1, V2, e V4 na lâmina de 100% que obtiveram valores de até 83 t h^{-1} , já a variedade V8 e V6 na lâmina de 50% foi a que apresentou as menores respostas nos valores da produção de biomassa.

Figura 37 – Total de biomassa de cana de açúcar em toneladas por hectare produzido por hectare nas oito variedades de cana e açúcar submedidas as lâminas de 50, 75, 100 e 125%*

4.7 Estimativas de fixação de carbono na biomassa e do particionamento na cana-de-açúcar

As estimativas para fixação de carbono na biomassa de cana-de-açúcar foram baseadas na produção de biomassa do colmo, bainhas, folhas, ponteiros e raiz. Hassuani, Leal e Macedo (2005); Campos (2003) salientam que para cada tonelada de biomassa produzida os valores de carbono fixados na biomassa é de 42 a 45%, isso para colmos, bainhas, folhas, ponteiros, perfilhos mortos e raízes. Campos (2003) em trabalhos realizados com cana-de-açúcar chegou ao valor de 42,86% de carbono e esse valor foi adotado para as estimativas da quantidade de carbono fixado na biomassa total e particionada da cana-de-açúcar.

Os valores de carbono fixados na biomassa da cana-de-açúcar são vistos na Figura 38 para o ciclo cana planta e cana soca. As lâminas de irrigação que apresentaram as melhores condições para produção de biomassa foi lâmina de 100% nos dois ciclos de produção com 30,66 e 39,49 t carbono fixada h^{-1} . Vale ressaltar que a lâmina 75% do ciclo cana soca apresentou uma redução de 7,72% quando comparado com a lâmina de 100% do mesmo ciclo. Já na no ciclo da cana planta a relação entre a lâmina de 75% com a de 100% a redução foi de 19,83% na fixação de carbono na biomassa.

Figura 38 – Total de Carbono fixado na fitomassa de cana de açúcar em toneladas por hectare nas quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100 e 125%* média das oito variedades para o ciclo cana planta e cana soca

Conforme é demonstrado na Figura 39 a parte área da cana-de-açúcar é composta por diversas partes sendo elas: colmos, bainhas, folhas, despontes, perfilhos mortos. Na mesma figura pode-se observar o particionamento do carbono fixado em cada componente para as médias das oito variedades em porcentagem com base no manejo da lâmina de 100% de irrigação.

Conforme os dados obtidos para essa condição de manejo de 100% de irrigação são fixados 53,76% do carbono nos colmos, 10,74% nas bainhas, 20,49% nas folhas, 6,37% nos despontes e 8,64% nos perfilhos mortos.

Figura 39 – Composição do percentual de carbono média fixado em cada parte da cana-de-açúcar: colmos, bainhas, folhas, despontes e perfilhos mortos para as oito variedades estudadas no ciclo cana soca irrigado com lâmina de 100%

O particionamento do carbono na cana-de-açúcar pode ser observado na Figura (40 A) percentual de carbono nos colmos, (40 B) folhas, (40 C) bainhas, (40 D) despontes e (40 E) perfilhos mortos, nas oito variedades estudadas submetidas às quatro lâminas de irrigação 50, 75, 100, 125%.

De acordo com os dados da Figura (40 A) independente da lâmina aplicada no manejo da irrigação as variedades que apresentaram os maiores percentuais de fixação de Carbono foram às variedades V6 e V3 com 59,64% e 58,01 de todo o carbono fixado na planta respectivamente ao fim do ciclo. Vale ressaltar que a variedade V6 apresentou também similaridade na fixação de carbono nas quatro condições de manejo adotado, o que implica em maiores volumes de colmos pela variedade uma vez que o percentual de carbono é baseado na massa seca ao fim do ciclo. Já a variedade que apresentou a menor fixação de carbono foi a V7 com 45,53%.

Para fixação de carbono nas folhas da cana-de-açúcar Figura (40 B) a maior massa de carbono foi observada na variedade V7 com 24,25 % de todo o carbono fixado pela planta. Com os menores percentuais de carbono fixados nas folhas estão às variedades V6, V4 e V5 com 15,09, 19,10 e 19,21% respectivamente. Através dos dados analisados constatou-se que à

medida que o percentual da massa de carbono nas folhas aumenta, a massa de carbono fixada nos colmos diminui.

Quanto ao particionamento do carbono para as bainhas as bainhas Figura (40 C), independente da lâmina aplicada à variedade que apresentou o maior percentual foi a V5 com 13,06 do carbono total fixado pela planta e com o menor percentual ficou a V3 com 9,32%. De maneira geral a variabilidade entre as variedades foi de 3,72% entre as lâminas foi de 1,57% para massa de carbono nessa parte da planta.

Na Figura (40 D) pode ser observado o percentual de carbono particionado para os ponteiros das oito variedades estudadas nas quatro lâminas de irrigação aplicadas. Sendo que as variedades V5 e V8 foram as que apresentaram maior percentual de carbono particionado chegando a 7,25 e 7,18% respectivamente, e com o menor percentual ficou a V6 com 3,59%, independente da lâmina aplicada nas variedades.

Nos percentuais de carbono particionado para perfilhos mortos Figura (40 E) a lâmina de 50% condicionou as variedades os maiores valores de carbono particionado para essa variável chegando 8,94% com destaque para as variedades V7 e V7 com 12,77 e 11,25% de massa de carbono para perfilhos mortos dentro dessa lâmina.

Figura 40 – Percentual do carbono para as oito variedades estudadas, nas dentro de cada lâmina de irrigação. (A) percentual do carbono das hastes ou colmo, (B) folhas, (C) bainhas, (D) despontes e (E) perfilhos mortos

4.8 Produtividades da água e do carbono

A produtividade da água para biomassa trata-se do peso em quilogramas – kg de biomassa seca por volume de água m^{-3} , ou seja, para que uma condição de manejo ou uma variedade seja eficiente no uso da água ela deverá produzir o máximo de biomassa – kg por m^{-3} de água evapotranspirada. A produtividade da água para cana soca pode ser observada na Figura 41 onde foram estudadas oito variedades sob quatro lâminas de manejo de irrigação; a produtividade da água média no experimento foi de $7,28 \text{ kg MS m}^{-3}$. Embora os dados evidenciem que estatisticamente as variedades estudadas não apresentam diferença estatística pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade, observa-se a que as variedades com as lâminas de 50% apresentaram maiores produtividades da água como é o caso de V1, V3, V5 e V6 com os valores de 8,43, 8,35, 7,25 e 9,28 kg m^{-3} respectivamente.

Nas lâminas aplicadas as que apresentaram melhores produtividades da água foram as lâminas 50 e 75% diferindo estatisticamente das demais pelo teste de média de Scott Knott.

Figura 41 – Valores de produtividade da água para biomassa total – PAB em quilogramas de biomassa por metro cúbico de água aplicada para as oito variedades estudadas, nas dentro de cada lâmina de irrigação (A) e produtividade da água para biomassa total – PAB na lâmina independente das variedades (B). ^{ns} não diferem significativamente entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

A produtividade da água para biomassa estimada trata-se da conversação da fixação de CO_2 medido com o analisador de gases por infravermelho – IRGA pela transpiração da planta que também medida com o IRGA, assim converteu-se $\mu\text{mol CO}_2$ para mol CO_2 multiplicado pela massa molar do CO_2 , assim tem-se g CO_2 . Já a transpiração no aparelho é dada por $\text{mmol H}_2\text{O}$, o que por sua vez foi convertido em $\text{mol H}_2\text{O}$ multiplicado pela massa molar de H_2O , chegando à unidade de $\text{g H}_2\text{O}$ transpirada.

No entanto a unidade para produtividade de água é de kg MS.m^{-3} , assim converteu-se g CO_2 para kg CO_2 e $\text{g H}_2\text{O}$ para m^{-3} , considerando-se a densidade da água igual a um. Assim dividindo-se massa de CO_2 pela transpiração de H_2O tem-se eficiência instantânea do uso da água. Estima-se que para cada unidade de carbono fixada na biomassa 3,67 unidade de CO_2 é retirada da atmosfera, ou seja, divide-se a massa de CO_2 por 3,67 pra chegar à unidade de carbono. Já para chegar à unidade de biomassa sabe-se que na biomassa de cana-de-açúcar seca 42,86% é massa de carbono, então dividindo-se a massa de carbono por 42,86%, obtêm-se a biomassa estimada para cada condição de manejo nas oito variedades estudadas.

Já com o valor de biomassa em kg e sabendo-se o consumo de cada variedade em m^{-3} dividindo-se a biomassa kg pelo consumo de água m^{-3} tem-se a produtividade da água potencial estimada para biomassa na Figura 42; para essas estimativas a variedade que apresentou a maior produtividade da água independente da lâmina foi a V1 com média de 35,6 kg de biomassa m^{-3} de água, já V2 foi a que apresentou a menor média com 27,1 kg m^{-3} . Já entre as lâminas e independente da variedade a lâmina, destaque para lâmina 75% que contribuiu para produtividade da água com média de 33,4 kg m^{-3} , já a lâmina de 125% mostrou-se menos eficiente que as demais com produtividade da água de 27,6 kg m^{-3} .

Figura 42 – Valores de produtividade da água estimada para biomassa – PABE (medido com o IRGA) em quilogramas de biomassa por metro cúbico de água aplicada para as oito variedades estudadas, nas dentro de cada lâmina de irrigação. ^{ns} não diferem significativamente entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

A Figura 43 apresenta a relação entre a produtividade da água pra biomassa estimada – PABE com o IRGA e produtividade da água para biomassa medida no experimento ao longo de todo o ciclo de crescimento – PABM. Esses resultados foram obtidos dividindo a PABE pela PABM, assim o resultado apresentado trata-se de um fator, ou seja, um número que relata quantas vezes a PABE está sendo em relação à PABM nas oito variedades estudadas nas quatro lâminas de irrigação usadas no experimento.

Na média do experimento a PABE foi de 4,3 vezes mais que o PABM. Já entre as lâminas aplicadas independente da variedade a lâmina de 50% foi a que apresentou a maior relação chegando a 4,7 vezes mais que os valores observados nas medidas. Entre as variedades estudadas independente da lâmina a que apresentou a maior relação foi a V1 com 5,1 vezes mais, e com a menor relação ficou a V2 com valor de 3,5 vezes.

Figura 43 – Relação entre a Produtividade da água pra biomassa estimada – PABE com o analisador de gases por infravermelho e produtividade da água para biomassa medida no experimento – PABM

4.9 Produção relativa L50/L100 para fotossíntese instantânea medida com o analisador de gases por infravermelho – IRGA e para biomassa medida no experimento

Na Figura 24 é apresentada a relação da Biomassa produzida usando como fonte de irrigação a lâmina de 50% com a biomassa produzida na lâmina de 100% para todas as variedades estudadas, adotou-se o mesmo raciocínio para os dados medidos de trocas gasosas (IRGA) e assim obtendo-se os valores percentuais entre as duas lâminas analisadas.

Essa relação permite estabelecer em quais as variedades a medição da fotossíntese (IRGA) está próxima das relações encontradas com a biomassa medida no final do ciclo. As variedades que apresentam melhor relação são as variedades V3, V4 e V2, já as que apresentam as piores relações são as variedades V6 e V7, enquanto que as variedades V6 e V8 apresentaram diferença maior que 30% entre as condições observadas.

Vale salientar que na Figura 44 (Diferença entre 50 – 100%) quando o valor percentual da diferença apresentar-se positivo significa que na relação entre a lâmina de 50 com a de 100% para fotossíntese foi maior que a relação feita da lâmina de 50 com a de 100% para produção de biomassa medida. Quando os valores apresentaram são negativos significam que a relação entre a lâmina de 50 com de 100% significa que a fotossíntese apresentou um percentual menor da relação entre as duas.

Figura 44 – Relações das taxas de percentual da matéria seca da biomassa de cana de açúcar na lâmina de 50% com a lâmina de 100%. Relações do monitoramento de fotossíntese das oito variedades de cana de açúcar na lâmina de 50% com a lâmina de 100% e a diferença percentual da biomassa medida com o monitoramento das respectivas lâminas

5 CONCLUSÕES

Com base nas condições em que o experimento foi conduzido, pode-se concluir que:

a) Confirmou-se a hipótese do trabalho de que é possível estimar a eficiência do uso da água e o acúmulo final de carbono na cultura de cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo, através de medidas pontuais da taxa de fotossíntese e transpiração (IRGA – Trocas gasosas) nos estágios iniciais e intermediários de crescimento da cultura, de modo tal que não seja necessário à condução das plantas durante todo o ciclo de crescimento para a estimativa da biomassa produzida por unidade de água evapotranspirada;

b) Os valores pontuais de produtividade da água potenciais calculados com base nas leituras de trocas gasosas na folha +1 (IRGA) são valores potenciais superiores aos valores experimentais observados para as plantas durante todo o ciclo de crescimento. Para se determinar a produtividade da água real ao nível de planta durante todo o ciclo de cultivo, é necessário dividir o valor pontual estimado com o IRGA, por um fator variou entre 3,1 e 5,2 dependente da variedade para o nível de irrigação 100%;

c) Os valores de produtividade da água potenciais estimados com o IRGA oscilaram entre 21 a 42 kg de matéria seca m^{-3} de água evapotranspirada. Os valores de produtividade da água reais medidos no experimento oscilaram entre 5 a 9 kg de matéria seca m^{-3} de água evapotranspirada.

d) Em relação às variedades, as que apresentaram os maiores acúmulos de biomassa foram às variedades V1, V2 e V4 para a lâmina de irrigação de 100%, com produtividades acima de até 80 t ha^{-1} de biomassa seca;

e) Para todas as variedades estudadas, exceto as variedades V6 e V7, a produção relativa entre os valores de fotossíntese medidos com o IRGA nas lâminas de 50 e 100 % de irrigação (1000 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e 400 ppm CO_2) são muito próximos das relações obtidas entre os valores de biomassa medidos no final dos experimentos nas mesmas lâminas de irrigação. Portanto, as medidas de fotossíntese realizadas com o IRGA, permitem comparar de maneira relativa à produtividade de biomassa das lâminas de irrigação nas fases iniciais de crescimento das plantas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, D.J.; ORT, D.R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warmclimate plants. **Trends in Plant Science**, London, v. 6, n. 1, p. 36-42, 2001.
- ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Piracicaba: Edição do Autor, 2002. 272 p.
- BALDOCCHI, H. F.; DENNIS, D.; BRUCE, B.; HICKS, A.; TILDEN, P.; MEYERS, J. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, Nebraska, v. 69, n. 5, p. 1331-1340, 1988.
- BEGUM, M.K.; ALAM, M.R.; ISLAM, M.S.; AREFIN, M.S. Effect of water stress on physiological characters and juice quality of sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 14, n. 2, p. 161–167, 2012.
- BERGONCI, J.I.; PEREIRA, P.G. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 10, n. 2, p. 229-235, 2002.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- BLUME, H. **Geography of sugar cane: environmental, structural and economical aspects of cane sugar production**. Berlin: Dr. Albert Bartens Verlag, 1985. 248 p.
- BOARETTO, L.F.; CARVALHO, G.; BORGIO, L. Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 74, n. 2, p. 165–175, 2014.
- BRANDES, E.W. Origin, dispersal and use in breeding of the Melanesian garden sugarcanes and their derivatives, *Saccharum officinarum* L. **International Society of Sugar Cane Technologists**, Mauritius, v. 9, n. 3, p. 709–750, 1956.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **A produção de energia elétrica a partir da biomassa**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 01 maio 2015.
- CALGARO, M.; COELHO, D.S. Respostas de variáveis fisiológicas e tecnológicas da cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 1, p. 11–20, 2015.
- CAMPOS, D.C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para sequestro de carbono**. 2003. 103 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Biossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: quarto levantamento**. Brasília, 2014. p. 1-14. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 01 maio 2015.

COSTA, G.F.; MARENCO, R.A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta Amazônica**, Manaus, v. 37, n. 2, p. 229-234, 2007.

CRUZ, R.F.D. **Indução e recuperação do estresse hídrico em variedades portuguesas de milho**. 2006. 182 p. Dissertação (Mestrado em Produção Agrícola) - Universidade do Milho, Braga, 2006.

DANIELS, J.; ROACH, B.T. Taxonomy and evolution in sugarcane. In: HEINZ, D.J. (Ed.). **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier Press, 1987. v. 18, n. 1, p. 7-84.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.; AZEVEDO, H.M.; AZEVEDO, C.A.V. 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.

DORNELAS, M.C.; RODRIGUEZ, A.P.M. A genomic approach to elucidating grass flower development. **Genetics and Molecular Biology**, Amsterdam, v. 24, p. 69-76, 2001.

DU, Y.C.; NOSE, A.; WASANO, K. Effects of chilling temperature on photosynthetic rates, photosynthetic enzyme activities and metabolite levels in leaves of three sugarcane species. **Plant, Cell and Environment**, Malden, v. 22, n. 3, p. 317-324, 1999.

ESAU, K. **Plant anatomy of seed plants**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1977. 550 p.

FAO. **Statistical yearbook 2013: world food and agriculture**. Disponível em: <http://www.fao.org/economic/ess/ess-publications/ess-yearbook/en/#.VDwCm_ldV-4>. Acesso em: 01 maio 2015.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J. Índices 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.

GALON, L.; FERREIRA, E.A.; SILVA, A.F.; NOLDIN, J.A.; FREITAS, M.A.M. Competição entre plantas de arroz e biótipos de capim-arroz (*Echinochloa spp.*) resistente e suscetível ao quinclorac. **Planta Daninha**, Ponta Grossa, v. 27, n. 4, p. 701-709, 2009.

GHANNOUM, O.; CONROY, J.P.; DRISCOLL, S.P.; PAUL, M.J.; FOYER, C.H.; LAWLOR, D.W. Nonstomatal limitations are responsible for drought-induced photosynthetic inhibition in four C₄ grasses. **New Phytologist**, Oxford, v. 159, n. 2, p. 599-608, 2003.

GILBERT, R.A.; RAINBOLT, C.R.; MORRIS, D.R. Morphological responses of sugarcane to long-term flooding. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 4, p. 1622-1628, 2007.

GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The relation between total invertase activity and internode expansion in sugar-cane stalks. **International Society Sugarcane Technologists**, Amsterdam, v. 12, n. 2, p. 575-681, 1965.

GLAZ, B.; MORRIS, D.R.; DAROUB, S.H. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table. **Crop Science**, Madison, v. 44, n. 1, p. 1633-1641, 2004.

GODOY, A.P. **Modelagem de processos de acumulação de biomassa e de açúcar da cana-de-açúcar via sistemas nebulosos**. 2007. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

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

GRIVET, L.; GLASZMANN, J.C.; D'HONT. A Molecular evidences for sugarcane evolution and domestication. In: MOTLEY, T.; ZEREGA, N.; CROSS, H. (Ed.). **Darwin's harvest: new approaches to the origins. evolution, and conservation of crop**. New York: Columbia University Press, 2006. p. 49–66.

HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: CTC; PNUD, 2005. 270 p.

HATCH, M.D.; SLACK, C.R.; JOHNSON, H.S. Further studies on a new pathway of photosynthetic CO₂ fixation in sugarcane and its occurrence in other plant species. **Journal Biochemical**, London, v. 102, n. 1, p. 417–422, 1967.

HSIAO, T.C. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, Berlin, v. 25, n. 2, p. 189–207, 2007.

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

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 4, p. 185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 59, p. 13–26, 2008.

INMAN-BAMBER, N.G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 134, p. 95–104, 2012.

IRVINE, J.E. Sugar-cane. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Potential productivity of field crops under different environments**. Los Baños, 1983. p. 361–381.

JAMES, E.K.; REIS, V.M.; OLIVARES, F.L. Infection of sugarcane by the nitrogen-fixing bacterium *Acetobacter diazotrophicus*. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 45, p. 757–766, 1997.

- KOTEYEVA, N.K.; VOZNESENSKAYA, E.V.; EDWARDS, G.E. An assessment of the capacity for phosphoenolpyruvate carboxykinase to contribute to C₄ photosynthesis. **Plant Science**, Limerick, v. 235, p. 70–80, 2015.
- KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press, 1995. 495 p.
- KREBS, O.; GOLEBIEWSKI, M.; KANIA, R.A. Data warehouse for biochemical reactions and their kinetics. **Journal of Integrative Bioinformatics**, Oxford, v. 5 p. 4-49, 2007.
- LARCHER, W. **Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups**. 4th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 564 p.
- LONG, S.P.; WOOLHOUSE, H.W. Responses of net photosynthesis to light and temperature in *Spartina townsendii* a C₄ species from a cool temperate climate. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 29, n. 3, p. 803–814, 1978.
- LONG, S.P.; FARAGE, P.K.; GARCIA, R.L. Measurement of leaf and canopy photosynthetic CO₂ exchange in the field. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, p. 1629–1642, 1996.
- LONG, S.P.; AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A.; ORT, D.R. Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, p. 591–628, 2004.
- LU, D.; ZHANG, J. Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 50, n. 336, p. 1199-1206, 1999.
- MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, E.C.; RIBEIRO, R.V. Photosynthetic limitations imposed by self-shading in field-grown sugarcane varieties. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.155, p. 30–37, 2014.
- MARTIN, J.P. **Sugarcane diseases in Hawaii**. Honolulu: Advertiser Publ., 1938. 212 p.
- MASSAD, R.S.; TUZET, A.; BETHENOD, O. The effect of temperature on C₄-type leaf photosynthesis parameters. **Plant, Cell and Environment**, Malden, v. 30, n. 9, p. 1191–1204, 2007.
- MATSUOKA, S.; GARCIA, A.A.F.; ARIZONO, H. Melhoramento da cana-de-açúcar. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: UFV, 2005. p. 225-274.
- MCCORMICK, A.J.; CRAMER, M.D.; WATT, D.A. Regulation of photosynthesis by sugars in sugarcane leaves. **Journal of Plant Physiology**, Paris, v. 165, n. 17, p. 1817–1829, 2008.
- MONTEITH, J.L. The exchange of water and carbon by crops in a Mediterranean climate. **Irrigation Science**, Berlin, v. 14, n. 2, p. 85–91, 1993.
- MUHAI DAT, R.; SAGE, R.F.; DENGLER, N. G. Diversity of Kranz anatomy and biochemistry in C₄ eudicots. **Jornal Botany**, Amsterdam, v.94 p.362–381, 2007.

MUKHERJEE, S.K. Origin and distribution of *Saccharum*. **Botanical Gazette**, Chicago, v. 119, p. 55–61, 1957.

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

NELSON, T. The grass leaf developmental gradient as a platform for a systems understanding of the anatomical specialization of C4 leaves. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, p. 3039–3048, 2011.

NORMAN, J.M.; GARCIA, R.; VERMA, S.B. Soil surface CO₂ fluxes and the carbon budget of a grassland. **Journal of Geophysical Research**, Oklahoma, v. 97, p. 18845-18853, 1992.

NOSE, A.; NAKAMA, M. Effects of leaf nitrogen content on leaf photosynthetic characteristics of sugarcane (*Saccharum* spp.). **Japanese Journal of Crop Science**, Tokyo, p.641– 648, 1990.

OLIVETTE, M.P.; NACHILUK, K.; FRANCISCO, V.L.F.S. Análise comparativa da área plantada com cana-de-açúcar frente aos principais grupos de culturas nos municípios paulistas. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 40, n. 2, p. 1-18, 2010.

PARK, S.E.; ROBERTSON, M.; INMAN-BAMBER, N.G. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2, p. 305–320, 2005.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: language and environment for statistical computing. Vienna, 2013. 795 p.

REMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation on sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 32, p. 185-196, 2000.

RENOUF, M.A.; WEGENER, M.K.; NIELSEN L.K. An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 32, p. 1144-1155, 2008.

RIBEIRO, R.V.; MACHADO, D.F.; DOVIS, V.L.; ANDRADE, L.M. Revealing drought-resistance and productive patterns in sugarcane genotypes by evaluating both physiological responses and stalk yield. **Experimental Agriculture**, London, v. 49, n. 2, p. 212–224, 2013.

RODRIGUES, C.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, D.F.; DOVIS, V.L.; ANDRADE, L.M. Trocas gasosas e balanço de carboidratos em plantas de cana-de-açúcar sob condições de estresses radiculares. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 319-329, 2012.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP, 1995. 75 p.

SAGE, R.F. The evolution of C4 photosynthesis. **New Phytologist**, Berlin, v. 161, p. 341–370, 2004.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT™ SAS user's guide for windows environment**. 6.11 ed. Cary, 1995. 534 p.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974.

SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.N. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2006. 415 p.

SHEN, Y.; ZHANG, Y.; KONDOH, A.; TANG, C.; CHEN, J.; XIAS, J.; SAKLLRA, Y.; LIU, C.; SUN, H. Seasonal variation of energy partitioning in irrigated lands. **Hydrological Processes**, Texas, v. 18, n. 12, p. 2223-2234, 2004.

SHENG, M.; TANG, M.; CHEN, H.; YANG, B.; HUANG, Y. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. **Mycorrhiza**, New York, v. 18, p. 287-296, 2008.

SILVA, A.; COSTA, W.; BANDARA, D. Growth of root system and the patterns of soil moisture utilization in sugarcane under rain-fed and irrigated conditions in Sri Lanka. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 13, p. 198-205, 2011.

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

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

SMITH, S.E.; REED, D.J. **Mycorrhizal symbiosis**. London: Academic Press. 1997. 251 p.

SMITH, B.N. Photosynthesis, respiration and growth. In: PESSARAKLI, M. **Handbook of photosynthesis**. London: Taylor & Francis, 2004. p. 671-677.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 169-183, 2005. Special issue.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 526 p.

VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica; New York: Stechert-Hafner, 1952. 371 p.

VAN GENUCHTEN, M.T.H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science**, Amsterdam, v. 44, p. 892-898, 1980.

VOURLITIS, G.L.; OECHEL, W.C.; HASTINGS, S. J.; JENKINS, M.A. A System for measuring in situ CO₂ and CH₄ flux in unmanaged ecosystems. **Atmospheric Environment**, Berkeley, v. 7, p. 369-379, 1993.

VOZNESENSKAYA, E.V.; FRANCESCHI, V.R.; EDWARDS, G.E. Light-dependent development of single cell C₄ photosynthesis in cotyledons of *Borszczowia aralocaspica* (Chenopodiaceae) during transformation from storage to a photosynthetic organ. **Botany**, Amsterdam, v. 93, p. 1–11, 2004.

VU, J.C.V.; ALLEN, L.H. Jr. Growth at elevated CO₂ delays the adverse effects of drought stress on leaf photosynthesis of the C₄ sugarcane. **Journal of Plant Physiology**, Paris, v. 166, p. 107–116, 2009.

WACLAWOVSKY, A.J.; SATO, P.M.; LEMBKE, C.G. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, Philadelphia, v. 8, p. 263–276, 2010.

WAN, X.; LANDHAÜSSER, S.M.; ZWIAZEK, J.J.; LIEFFERS, V.J. Root water flow and growth of aspen (*Populus tremuloides*) at low root temperatures. **Tree Physiology**, New York, v. 19, p. 879–884, 1999.

WAN, X.; LANDHAÜSSER, S.M.; JANUSZ, J.; ZWIAZEK, J.J.; LIEFFERS, V.J. Stomatal conductance and xylem sap properties of aspen (*Populus tremuloides*) in response to low soil temperature. **Physiologia Plantarum**, Quebec, v. 122, p. 79–85, 2004.