

GUSTAVO HADDAD SOUZA VIEIRA

USO RACIONAL DA ÁGUA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR  
IRRIGADA NO NORTE DE MINAS GERAIS

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

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

T

V658u  
2012

Vieira, Gustavo Haddad Souza, 1975-

Uso racional da água na cultura da cana-de-açúcar irrigada  
no Norte de Minas Gerais / Gustavo Haddad Souza Vieira.

– Viçosa, MG, 2012.

xiv, 101f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Irrigação por aspersão. 2. Cana-de-açúcar - Irrigação.
  3. Cana-de-açúcar - Rendimento. 4. Evapotranspiração.
  5. Estresse hídrico. I. Universidade Federal de Viçosa.
- II. Título.

CDD 22. ed. 631.587

GUSTAVO HADDAD SOUZA VIEIRA

USO RACIONAL DA ÁGUA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR  
IRRIGADA NO NORTE DE MINAS GERAIS

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

APROVADA: 11 de junho de 2012.

---

Prof. Luís César Dias Drumond

---

Prof. Rubens Alves de Oliveira

---

Prof. Silvio Bueno Pereira

---

Dr. Vinicius Bof Bufon

---

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama  
(Coorientador)

Ao meu filho Fabrício e à minha esposa Paola,

**DEDICO.**

Aos meus pais José Anilton e Fátima,

**OFEREÇO.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por meio do Departamento de Engenharia Agrícola e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (Área de Concentração em Recursos Hídricos e Ambientais), pela oportunidade em cursar o Doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Banco do Nordeste do Brasil (BNB) pelo apoio financeiro na execução dos experimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento de bolsa de estudo, através do Programa PIQDTec.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo *campus* Santa Teresa (IFES), por me conceder o afastamento para cursar o Doutorado.

Ao Prof. Everardo Chartuni Mantovani, pela orientação e conhecimentos transmitidos e por acreditar e incentivar as pessoas.

À SADA Bioenergia e Agricultura pelo apoio operacional e infra-estrutura cedida, em nome do Newton e do Ari.

À Irriger e à Irriplus pelo apoio técnico e cessão dos softwares de gestão de irrigação.

Ao meu filho Fabrício, pelo carinho e amor incondicional. À minha esposa Paola, pelo carinho, amor, apoio e incentivo e por me fazer acreditar que essa conquista seria possível.

Aos meus pais, José Anilton e Fátima, às minhas irmãs, Christina, Carolina e Larissa, meus sobrinhos Isabela e Vinícius e cunhados, Paulinho, Cristiano e Raphael, pelo apoio, carinho e incentivo.

Aos meus sogros Luigi e Margarida, aos meus cunhados Silvio, Marcelo e Cristina e meus sobrinhos Mariana, Luigi, Enzo, Enrico e Aléxia, pela amizade, carinho e momentos agradáveis.

Ao Prof. Gilberto Chohaku Sediyaama, pelas orientações, ensinamentos e palavras de sabedoria.

Ao Prof. Paulo Roberto Cecon, pelo apoio nas análises estatísticas.

Aos professores e funcionários do DEA, pela convivência e apoio no desenvolvimento do Doutorado, em especial aos laboratoristas Chicão, Eduardo e José Antônio.

Aos meus estagiários Gabriel e Felipe, em especial ao Fábio, e aos amigos Geraldo e Alan pelo apoio e companheirismo nas avaliações experimentais.

Aos meus ex-alunos Antônio e Ozéias, hoje funcionários da Sada e da Irriger, respectivamente, pelo apoio na condução dos experimentos.

Aos amigos e colegas Silvânio, Leônidas, Gustavo Dantas, Marcelo Rossi, Caio, Fernando, Breno, Contin, Henrique, Joselma, Dani, Chiquinho, David, Wady, Bruno, Robinho, Jean, Glaucio, Victor, Danilo, Valdeir, Júlio, Gueila, Davi e Toninho, pelos bons momentos vividos e intercâmbio de conhecimentos.

Ao motoclube “Brothers in the Highway” (Ciro, Luiz Cláudio, Thiago e Rosana) e à Associação de Motociclistas de Viçosa (A.M.O. Viçosa) por me fazerem sentir um cidadão Viçosense e pelas amizades construídas em passeios e viagens.

Aos amigos Élio Cordeiro, Marita e Luiz Marcari por me apoiarem e viabilizarem meu afastamento para o Doutorado.

Ao Prof. José Geraldo, pela amizade e por acreditar na continuidade deste trabalho.

A todos meus familiares e amigos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

Gustavo Haddad Souza Vieira, filho de José Anilton Dias Vieira e Fátima Haddad Souza Vieira, nasceu em Vitória, ES, em 16 de setembro de 1975.

Em 1994 iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, graduando-se em janeiro de 2000.

Em fevereiro de 2001 iniciou o Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, da UFV, concluindo em dezembro de 2002.

Em março de 2003, iniciou a carreira docente no CEFET Januária, em Januária, MG, onde atuou até dezembro de 2007, quando foi redistribuído para a Escola Agrotécnica Federal de Santa Teresa, em Santa Teresa, ES, atualmente IFES *campus* Santa Teresa.

Em fevereiro de 2009 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, concluindo em junho de 2012.

Não é que tenhamos pouco tempo, nós é que o desperdiçamos. (Sêneca)

## RESUMO

VIEIRA, Gustavo Haddad Souza, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2012. **Uso racional da água na cultura da cana-de-açúcar irrigada no Norte de Minas Gerais**. Orientador: Everardo Chartuni Mantovani. Coorientador: Gilberto Chohaku Sedyama.

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se definir estratégias tecnológicas para o manejo racional da irrigação da cultura da cana-de-açúcar no semi-árido norte mineiro, de modo a otimizar os recursos de produção, principalmente a água e a energia elétrica, maximizando a eficiência do uso da água pela cultura. Foram instalados três experimentos, no município de Jaíba/MG, cada um em uma área de aproximadamente 54 ha, irrigadas por pivô central. No primeiro experimento avaliou-se a produtividade e o rendimento industrial da cana-de-açúcar e avaliaram-se indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura em função de lâminas de irrigação; no segundo, estudou-se a redução da evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada em função do fator de disponibilidade de água no solo; e no terceiro experimento objetivou-se avaliar indicadores de desenvolvimento, maturação e produtividade da cana-de-açúcar em função da época de interrupção da irrigação. A área foi cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) cultivar RB 86-7515, no quarto ciclo (terceira soqueira), após a colheita da safra 2009/2010, para os experimentos de lâminas de irrigação e de redução da evapotranspiração e no terceiro ciclo (segunda soqueira) da cultura, em fase de maturação, para o experimento de interrupção da irrigação. O manejo da irrigação foi realizado com auxílio do aplicativo *Irriger*<sup>®</sup>, que determina a demanda hídrica da cultura. No experimento de lâminas, trocaram-se os bocais dos emissores, para a aplicação dos tratamentos, de modo que em cada vão entre torres do pivô fosse aplicada uma lâmina específica. O experimento foi montado com seis tratamentos (25, 50, 75, 100, 125 e 150% da ETc). Para se avaliar a redução da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar, em função do fator de disponibilidade de água no solo (fator “F”), foi conduzido um experimento com diferentes frequências de irrigação, com os fatores de disponibilidade hídrica do solo: 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9. No experimento de avaliação da melhor época de interrupção da irrigação, interromperam-se as irrigações nos dias 15 e 29 de agosto para os tratamentos T1 e T2, respectivamente, e nos dias 13 e 28 de setembro, para os tratamentos T3 e T4, respectivamente, no ano 2010. A colheita da cana para todos os tratamentos ocorreu no dia cinco de outubro. Com isso, as plantas

dos tratamentos T1, T2, T3 e T4 ficaram, respectivamente, 51, 37, 22 e 7 dias sem irrigação ou chuva (dsi). Com os resultados obtidos, para cana-de-açúcar cultivar RB 86-7515, de ciclo tardio, nas condições em que foi realizado o experimento, no semi-árido norte mineiro, foi possível concluir que: apesar de se atingir a produtividade máxima da cultura ( $112,3 \text{ t ha}^{-1}$ ) com  $1.537,2 \text{ mm}$  de água no ciclo da cultura, o máximo rendimento econômico ( $108,5 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi obtido com a lâmina de  $1.333,8 \text{ mm}$ . A lâmina que proporcionou a maior produtividade de açúcares ( $17,56 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi de  $1.508,4 \text{ mm}$ . O melhor rendimento econômico, em termos de açúcares por unidade de área, foi de  $17,4 \text{ t ha}^{-1}$  (lâmina recomendada), com fornecimento de  $1.406 \text{ mm}$  de água, resultando na necessidade de  $808 \text{ m}^3$  de água para se produzir uma tonelada de açúcar. Lâminas de irrigação maiores que  $1.000 \text{ mm}$  promoveram teores de dextrana acima dos limites estabelecidos para produção de açúcar. Recomenda-se para as indústrias de etanol e, principalmente de açúcar, introduzirem as análises de dextrana na rotina laboratorial. Houve tendência de aumento do índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar à medida que se aumentou a lâmina de irrigação no ciclo da cultura; o aumento do IAF foi mais acentuado nos tratamentos que receberam mais água; o potencial hídrico foliar foi menor para menores lâminas de irrigação, com destaque para o tratamento que recebeu menos água (25%); a temperatura foliar foi próxima à temperatura do ar nos tratamentos que receberam as maiores lâminas (100 a 150%), com tendência de aumento da diferença entre a temperatura das folhas, à medida que se reduziu o suprimento hídrico; houve tendência de aumento do índice de clorofila (ICF) à medida que se aumentou as lâminas, com leve queda nos tratamentos que receberam lâminas maiores que 100% da ETc. Ao se irrigar a cana com “f” 0,7, obteve-se 17% de redução da evapotranspiração da cultura, se comparado ao “f” 0,5; não se recomenda irrigar a cultura com “f” 0,3, visto que se aumenta o consumo de água em 20% se comparado ao “f” 0,5 e não se obtém aumento da produtividade de colmos e de açúcares; os maiores valores de EUA foram encontrados, com a lâmina de  $1.540 \text{ mm}$ , para as produtividades de colmos ( $8,29 \text{ kg m}^{-3}$ ) e de açúcares ( $1,22 \text{ kg m}^{-3}$ ); recomenda-se “f” de 0,5 no manejo da irrigação, visando maximizar a eficiência e uso de água para produtividades de colmos e açúcares; O maior rendimento de açúcares por área se deu no tratamento T2, com  $18,73 \text{ t}$  de açúcar por hectare, seguido de T1, com  $17,06 \text{ t ha}^{-1}$ , T3 com  $15,18 \text{ t ha}^{-1}$  e T4, com  $12,97 \text{ t ha}^{-1}$ . São necessários estudos que avaliem o comportamento da cana-de-açúcar em solos de textura argilosa e arenosa, com o manejo da irrigação feito em diferentes fatores “f”. Ocorreu antecipação da senescência foliar da cana-de-açúcar quando a irrigação foi interrompida no início da fase de maturação; a

interrupção da irrigação da cana-de-açúcar até 51 dias antes da colheita promoveu decréscimo na produtividade de até 26 t ha<sup>-1</sup>; não houve acréscimo de rendimento industrial (ATR) com a manutenção da irrigação até próximo à colheita; não se recomenda interromper a irrigação para a cultura da cana-de-açúcar, antes de sete dias antes da colheita, com a finalidade de aumentar o teor de sacarose nos colmos.

## ABSTRACT

VIEIRA, Gustavo Haddad Souza, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2012. **Rational use of water in the sugarcane irrigation in northern Minas Gerais State, Brazil.** Adviser: Everardo Chartuni Mantovani. Co-Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama.

This work was developed to define strategies for rational irrigation scheduling in cultivation of sugarcane in the northern semi-arid region of Minas Gerais State, Brazil, in order to optimize production resources, especially water and electricity to maximize crop water use efficiency. Three experiments were installed in the city of Jaíba, Minas Gerais, each in an area of approximately 54 ha irrigated by a center pivot system. The first experiment evaluated the yield and industrial productivity of sugarcane and as well as morphological and physiological indicators of water stress in function of irrigation depths; the second experiment studied the reduction of evapotranspiration for sugarcane irrigated under different conditions of water availability; and the third experiment evaluated indicators of sugarcane development, maturation and yield as a function of the date of irrigation interruption. The area was planted with sugarcane (*Saccharum sp.*) *Cultivar* RB 86-7515, utilizing plants in the fourth crop cycle (third ratoon) after the 2009/2010 harvest for the experiments of irrigation depths and the evapotranspiration reduction, and plants in the third cycle (second ratoon), in the maturation phase, for the experiment of irrigation interruption. The irrigation management was done with the software *Irriger*<sup>®</sup>, which determines the water requirements for the culture. In the experiment of irrigation depths, the emitter nozzles were exchanged for the application of treatments, so that at each vane between pivots a specific depth was applied, using six treatments (25, 50, 75, 100, 125 and 150% ETc). To evaluate the reduction of evapotranspiration for sugarcane by controlling the soil water availability ("f" factor), an experiment was conducted in an area that was divided into four quadrants, with the decision to application of different irrigation levels for each quadrant, resulting in different irrigation frequencies. The treatments corresponded respectively to the following factors of soil water availability: 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9. In the experiment evaluating the best time for irrigation interruption, water application was discontinued on June 15 and August 29 for T1 and T2, respectively, and on September 13 and 28 for T3 and T4, respectively, in 2010. Sugarcane harvest for all treatments occurred on October fifth, resulting in plants of T1, T2, T3 and T4 to remain 51, 37, 22 and 7 days

without irrigation or rainfall (dsi), respectively. With the results obtained for late maturity sugarcane RB 86-7515, under the conditions which the experiment was conducted in semi-arid northern Minas Gerais State, it was concluded that, although they reach the maximum yield ( $112.3 \text{ t ha}^{-1}$ ) with 1,537.2 mm of water in the crop cycle, the maximum economic yield ( $108.5 \text{ t ha}^{-1}$ ) was obtained with the depth of 1,333.8 mm. The depth that provided the highest sugar yield ( $17.56 \text{ t ha}^{-1}$ ) was 1,508.4 mm. The best economic performance, in terms of sugar per unit area, was  $17.4 \text{ t ha}^{-1}$  with supply of 1,406 mm of water (recommended depth), resulting in the demand of  $808 \text{ m}^3$  of water per ton of sugar produced. Irrigation depths greater than 1,000 mm promoted dextran levels above the limits established for sugar production. It is recommended for the ethanol, and especially for sugar industry, to introduce the analysis of dextran in the laboratory routine. There was a tendency for the leaf area index (LAI) of sugarcane to increase as increasing the irrigation depth in the crop cycle. The increase in LAI was greatest in treatments receiving more water, leaf water potential was lower for decreased irrigation levels, with emphasis on the treatment that received the least amount of water (25%). Leaf temperature was close to the air temperature in the treatments receiving the highest depths (100-150%), with a trend for greater difference between leaf temperature when decreasing the water supply. There was also a trend that the chlorophyll index (ICF) increases with increased irrigation depths, with a slight drop in treatments that received depths greater than 100% of the  $E_{Tc}$ . When irrigating sugarcane with "f" 0.7 there was a 17% reduction in evapotranspiration compared to the "f" 0.5. Irrigation at "f" 0.3 is not recommended since it increases water consumption by 20% compared to "f" 0.5 and there is no increase in stalk and sugar yield. Higher values in the water use efficiency (EUA) were found for the depth of 1540 mm with respect to stalks ( $8.29 \text{ kg m}^{-3}$ ) and sugar yields ( $1.22 \text{ kg m}^{-3}$ ). It is recommended to use "f" 0.5 for irrigation management to maximize EUA of stalks and sugar yield. The highest sugar yield per unit area occurred in T2, with 18.73 tons of sugar per hectare, followed by T1, with  $17.06 \text{ t ha}^{-1}$ , T3 with  $15.18 \text{ t ha}^{-1}$  and T4 with  $12.97 \text{ t ha}^{-1}$ . Studies are needed to evaluate the sugarcane development in clayey and sandy soils, with irrigation performed for different "f" factors. There was anticipation of leaf senescence in sugarcane when irrigation was stopped early in the maturation phase. The cessation of irrigation for sugarcane 51 days before harvest promoted a decrease in productivity of up to  $26 \text{ t ha}^{-1}$  and there was no increase of industrial yield (ATR) when maintaining irrigation until the next harvest. It is not recommended to interrupt irrigation of sugarcane at only seven days before harvesting in order to increase the sucrose content in the stalks.

## ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
BIBLIOGRAFIA.....	5
ARTIGOS CIENTÍFICOS.....	7
ARTIGO 1 - PRODUTIVIDADE E RENDIMENTO INDUSTRIAL DA CANA- DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO.....	8
1.1. INTRODUÇÃO.....	12
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
1.4. CONCLUSÕES.....	28
1.5. BIBLIOGRAFIA.....	29
ARTIGO 2 - INDICADORES MORFO-FISIOLÓGICOS DO ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO.....	33
2.1. INTRODUÇÃO.....	35
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	38
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
2.4. CONCLUSÕES.....	46
2.5. BIBLIOGRAFIA.....	47
ARTIGO 3 - REDUÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE- AÇÚCAR IRRIGADA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	51
3.1. INTRODUÇÃO.....	54
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	56

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
3.4. CONCLUSÕES.....	69
3.5. BIBLIOGRAFIA.....	70
ARTIGO 4 - ÉPOCA DE INTERRUPÇÃO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	73
4.1. INTRODUÇÃO.....	75
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	78
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.4. CONCLUSÕES.....	89
4.5. BIBLIOGRAFIA.....	90
CONCLUSÕES GERAIS.....	93
ANEXO.....	95

## INTRODUÇÃO GERAL

Com a expansão do setor sucroalcooleiro, impulsionada pelo crescimento da demanda mundial por combustíveis de origem renovável, há a necessidade de se aumentar a produção de cana-de-açúcar, com aumento da área plantada e da produtividade dos canaviais.

Segundo o Anuário da Cana (PROCANA, 2009), o etanol brasileiro, produzido a partir da cana-de-açúcar, foi reconhecido em maio de 2009 pela EPA (Environmental Protection Agency), a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, como o biocombustível que permite a maior redução de emissões de gases causadores do aumento do efeito estufa entre os disponíveis atualmente.

De acordo com o terceiro levantamento nacional da safra 2011/2012 (CONAB, 2011), a colheita total foi de 571,47 milhões de toneladas, 8,4% menor que na safra 2010/2011. O decréscimo é resultado das condições climáticas que não foram favoráveis à cultura nas regiões produtoras, com seca que atingiu o Centro-Sul do país, principalmente no segundo semestre de 2011.

No Brasil, a área cultivada com cana-de-açúcar foi estimada em 8.368,4 mil hectares. O Estado de São Paulo continua sendo o maior produtor com 52,2% (4.370 mil hectares), seguido por Minas Gerais, com 8,87% (742,65 mil hectares), Goiás com 8,1% (678,42 mil hectares), Paraná com 7,3% (611,44 mil hectares) Mato Grosso do Sul com 5,70% (480,86 mil hectares), Alagoas com 5,45% (463,65 mil hectares), e Pernambuco com 3,89% (326,11 mil hectares) (CONAB, 2011).

Segundo Cunha (2010), o cultivo da cana-de-açúcar pode crescer em novas fronteiras, assim como os biocombustíveis oriundos de óleos vegetais. De acordo com o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (BRASIL, 2009), o país dispõe de cerca de 63,48 milhões de hectares de áreas aptas à expansão do cultivo com cana-de-açúcar, sendo que destes, 18,03 milhões de hectares são considerados com alto potencial produtivo, 41,17 milhões de hectares como médio e 4,28 milhões de hectares como de baixo potencial para o cultivo. Estas estimativas demonstram que o país não necessita incorporar áreas novas e com cobertura nativa ao processo produtivo, visto que o estudo

foi elaborado, considerando-se áreas em produção agrícola intensiva, produção agrícola semi-intensiva, lavouras especiais (perenes, anuais) e pastagens, com base no mapeamento dos remanescentes florestais em 2002, realizado pelo Probio do Ministério do Meio Ambiente. As áreas aptas à expansão cultivadas com pastagens, em 2002, representaram cerca de 36,13 milhões de hectares.

No entanto, de acordo com Job (2010), há necessidade de crescimento da área cultivada com a cana-de-açúcar, visto que o açúcar, obtido das indústrias de processamento da cana, é cada vez mais demandado por países que estão ampliando o poder de compra e o consumo de alimentos processados. A maior expansão do consumo *per capita* deverá ocorrer em regiões como a Ásia, onde a renda cresce rapidamente.

No setor de energia, mais importante do que o preço, a confiabilidade do suprimento é o fator determinante de sucesso e longevidade. Foi a insegurança do consumidor, durante e após a crise de abastecimento de álcool de 1989-90, que causou a substituição do consumo do álcool hidratado pelo anidro, processo que levou à estagnação do consumo anual por praticamente 20 anos, entre 1986 a 2006, na faixa de 11,5 a 13,0 bilhões de litros. Felizmente, o consumo voltou a crescer com o sucesso da frota de veículos *flex*, com aumento de 2,4 bilhões somente em 2009. Seguindo essa linha de pensamento, nunca mais haverá falta de etanol, pois quando existir esse risco, o preço irá subir e a demanda vai cair (NASTARI, 2010).

De acordo com Rodrigues (2010), os horizontes para o futuro da cana-de-açúcar são promissores: a chamada “economia verde”, terminologia repetida à exaustão nos grandes encontros dos maiores líderes mundiais, abre espaços monumentais para a agroenergia, seja para biocombustíveis, seja para a bioeletricidade, seja para o uso do bagaço peletizado como alternativa à lenha em lareiras nos países frios.

É iminente o potencial de crescimento do uso da irrigação nos canaviais brasileiros, mesmo em regiões tradicionalmente produtoras, em que não se irriga a cana-de-açúcar. Equipamentos móveis, como o pivô central rebocável e o autopropelido podem ganhar espaço nesse cenário, para atender a irrigações suplementares e de salvação em períodos de veranicos que possam causar reduções significativas de produtividade da cultura.

Os Estados do Nordeste e a região Norte de Minas Gerais apresentam prolongados períodos com acentuados déficits hídricos onde a irrigação é fundamental para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. No entanto, onde há a prática da irrigação observa-se falta de uma gestão eficiente, diminuindo a produção.

A região norte mineira é caracterizada por temperaturas elevadas, alta intensidade luminosa e chuvas concentradas em um curto período do ano. Trata-se de uma região em plena fase de desenvolvimento agrícola, onde se encontram perímetros irrigados como é o caso do Distrito de Irrigação de Jaíba (DIJ). Esta região possui uma enorme demanda por pesquisa, visto que seu clima e solo são bem diferentes das regiões onde a agricultura desenvolve-se há vários anos. Uma das principais características dessa região é o alto déficit hídrico vigente por um longo período do ano, podendo este ser compensado com o uso da irrigação.

Considerando que o recurso água é um bem cada dia mais escasso e o custo de energia vem aumentando muito nos últimos anos, torna-se necessário um bom manejo da irrigação que resulte em economia de energia e água no setor do agronegócio, principalmente por se considerar a agricultura como o principal consumidor de água no Brasil. Segundo Fereres; Soriano (2007), a competição pela água por outros setores forçarão a irrigação a trabalhar sob escassez de água. A irrigação com déficit, pela redução de uso da água, poderá ajudar na competição pelo seu uso em situações onde o suprimento é restrito.

A agricultura tem sido responsável por grande parcela da água utilizada, tornando necessária a implantação de sistemas de irrigação eficientes, além da utilização de métodos que quantifiquem as necessidades hídricas das culturas, para que não haja desperdício (MANTOVANI et al., 2009). Essa quantificação permite projetar sistemas de irrigação mais adequados, o que, conseqüentemente, reduz o consumo da água e energia.

A irrigação suplementar da cana-de-açúcar é, hoje, uma das alternativas tecnológicas em busca do aumento da produção dessa cultura nas regiões antes marginalizadas pelo déficit hídrico vigente. No entanto, muitos produtores partem para a irrigação sem um planejamento adequado, sem considerar as necessidades hídricas, o manejo apropriado da água na cultura e sem conhecer as peculiaridades fisiológicas do crescimento da cana irrigada (DANTAS NETO et al., 2006).

Sendo a irrigação uma importante consumidora dos recursos hídricos, faz-se necessário a determinação real da necessidade hídrica das culturas para um uso eficiente e racional de água. No caso da cana-de-açúcar, é de grande importância a diminuição do custo da irrigação nas regiões que necessitam do mesmo, já que em regiões como São Paulo e Paraná praticamente não se irriga cana, obtendo-se assim, um menor custo de produção final.

Diante do exposto, no presente trabalho objetivou-se: Definir estratégias tecnológicas para o manejo racional da irrigação da cultura da cana-de-açúcar no semi-árido norte mineiro, com o intuito de otimizar os recursos de produção, principalmente a água e a energia elétrica, maximizando a eficiência do uso da água pela cultura; determinar a lâmina de irrigação recomendável para a cultura da cana-de-açúcar que forneça o ponto ótimo de rendimento econômico; relacionar parâmetros morfo-fisiológicos (IAF, teor de clorofila, potencial hídrico foliar e temperatura foliar) a indicadores de desenvolvimento vegetativo e produção da cultura da cana-de-açúcar submetida ao estresse causado pela deficiência ou excedente hídrico; avaliar a redução da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em função do fator de disponibilidade de água no solo (estresse controlado); e determinar a melhor época de interrupção da irrigação na cana-de-açúcar, visando maior rendimento industrial e otimização do uso da água.

## BIBLIOGRAFIA

BRASIL. **Decreto nº 6.961 de 18 de setembro de 2009**. Aprova o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar e determina ao Conselho Monetário Nacional o estabelecimento de normas para as operações de financiamento ao setor sucroalcooleiro, nos termos do zoneamento. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo. Brasília, DF, 18 set. 2009. Seção 1. p.1-30. 2009. Disponível em: <<http://www.in.gov.br>>. Acesso em: 18 de set. 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira – Cana-de-açúcar - Terceiro Levantamento: safra 2011/2012 – dezembro de 2011**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_12\\_08\\_11\\_00\\_54\\_08.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_12_08_11_00_54_08.pdf)> Acesso em: 13 de abr de 2012.

CUNHA, R.A.P. Desconcentração espacial da agricultura brasileira. **Revista Cana Mix**, n. 25, p. 120-121, 2010.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J.L. da C.; FARIAS, C.H. de A.; AZEVEDO, H.M. de; AZEVEDO, C.A.V. de. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.283–288. 2006.

FERERES, E.; SORIANO, M.A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v.58, p.147-159. 2007.

JOB, L. Do açúcar dos antigos engenhros às modernas usinas. **Revista Cana Mix**, n.29, p.70-72, 2010.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação - Princípios e Métodos**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 355 p.

NASTARI, P.M. A importância da confiabilidade. **Revista Cana Mix**, n.25, p.78, 2010.

PROCANA. **Agência ambiental dos EUA dá aval ao etanol de cana**. Ribeirão Preto: Procana, p.28, 2009.

RODRIGUES, R. **Prefácio**. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.) **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool – Tecnologias e perspectivas**. Viçosa: UFV, p.7-8, 2010.

## **ARTIGOS CIENTÍFICOS**

## ARTIGO 1

### PRODUTIVIDADE E RENDIMENTO INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO

#### RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de determinar as lâminas de irrigação que resultem na máxima produtividade, no máximo rendimento econômico e no máximo rendimento industrial da cana-de-açúcar e a relação existente entre a lâmina de água e a formação de dextrana. O experimento foi instalado em outubro de 2010 em Jaíba/MG, em uma área irrigada por pivô central, com cana-de-açúcar no quarto ciclo. Para a aplicação dos tratamentos, trocaram-se os bocais dos emissores, em cada vão entre torres do pivô central, de modo que fossem aplicadas as lâminas referentes a 25, 50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração da cultura, com o manejo da irrigação realizado para atender a demanda de 100%. Determinou-se a produtividade de colmos e o rendimento industrial da cana-de-açúcar, expressos em ATR e os teores de dextrana. Com os dados de produtividade e os custos relacionados à irrigação, calculou-se as lâminas para obtenção da máxima produtividade física ( $L_{mpf}$ ) e do máximo rendimento econômico ( $L_{mre}$ ), considerando-se a produtividade de colmos e de açúcares. Analisando-se os resultados obtidos, concluiu-se que: a lâmina que proporcionou a maior produtividade de colmos foi de 1.537 mm, para a produtividade de 112,3 t ha<sup>-1</sup>, ou seja, são necessários 136,9 m<sup>3</sup> de água para se produzir uma tonelada de colmos. A lâmina de maior rendimento econômico foi de 1.334 mm para uma produtividade de 108,5 t ha<sup>-1</sup>. O maior rendimento de açúcares (158,1 kg t<sup>-1</sup>) foi obtido com lâmina de 1.373 mm. A lâmina que proporcionou a maior produtividade de açúcares (17,56 t ha<sup>-1</sup>) foi de 1.508,4 mm. O melhor rendimento econômico, em termos de açúcares por unidade de área, foi de 17,4 t ha<sup>-1</sup>(lâmina recomendada), com fornecimento de 1.406 mm de água, resultando na necessidade de 808 m<sup>3</sup> de água para se produzir uma tonelada de açúcar. Lâminas acima de 1.000 mm no ciclo da cultura promoveram teores

de dextrana acima dos limites estabelecidos para produção de açúcar. Recomenda-se para as indústrias de etanol e, principalmente de açúcar, introduzirem as análises de dextrana na rotina laboratorial.

## PAPER 1

### PRODUCTIVITY AND INDUSTRIAL YIELD OF SUGARCANE AS A FUNCTION OF IRRIGATION DEPTHS

#### ABSTRACT

The present work was developed due to determine the irrigation depths that result in the maximum productivity, maximum economic yield and the maximum industrial yield of sugarcane, and the relationship between water depth and the formation of dextran. The experiment was installed in October 2010 in Jaíba/MG, Brazil, in an area irrigated by a center pivot with sugarcane in the fourth cycle. For the application treatments the emitter nozzles were exchanged so that the depths were applied referring to 25, 50, 75, 100, 125 and 150% of crop evapotranspiration with irrigation management performed to meet the 100% of the demand. Stalk productivity and industrial yield of sugarcane were determined, as well as levels of ATR and dextran. With productivity data and irrigation costs, the maximum productivity ( $Lmpf$ ), and maximum economic yield ( $Lmre$ ) were calculated considering the stalk and sugar yields. The values obtained were subjected to analysis of variance and subsequently developed regressions. Analyzing the results, it was concluded that: the depth that provided the highest stalk yield was 1,537 mm, for a yield of  $112.3 \text{ t ha}^{-1}$ , i.e.  $136,9 \text{ m}^3$  of water are necessary do produce one ton of stalks. The depth resulting in greatest economic yield was 1,334 mm for a yield of  $108.5 \text{ t ha}^{-1}$ . The greatest sugar yield ( $158.1 \text{ kg t}^{-1}$ ) was obtained with the depth of 1,373.1 mm. Highest sugar yield ( $17.56 \text{ t ha}^{-1}$ ) was obtained from the depth of 1,508 mm. The best economic performance, in terms of sugar per unit area was  $17.4 \text{ t ha}^{-1}$ , with supply of 1,405.9 mm of water, resulting in a water demand of  $808 \text{ m}^3$  to produce one ton of sugar. The best economic performance, in terms of sugar per unit area was  $17.4 \text{ t ha}^{-1}$  with the supply of 1,406 mm of water (recommended depth). Irrigation depths up to 1,000 mm in the crop cycle promoted dextran levels above the limits established for

sugar production. It is recommended that the ethanol industries, and especially sugar industries, utilize dextran analyses in the laboratorial routine.

## 1.1. INTRODUÇÃO

Devido à tendência de decréscimo de disponibilidade de água para a agricultura e ao aumento dos custos de energia (LÓPEZ-MATA et al., 2010), além da crescente preocupação mundial com os recursos hídricos, torna-se necessária a adoção de estratégias de manejo que possibilitem economia de água sem prejuízos da produtividade. Uma boa estratégia de manejo da irrigação é fundamental para economizar água sem, no entanto, por em risco o rendimento das culturas (JALOTA et al., 2006; PEREIRA et al., 2009).

O manejo adequado e estratégico da água pode ser feito utilizando-se o índice de eficiência de uso da água para o planejamento e a tomada de decisão da irrigação, aumentando-se a produtividade da cultura (KARATAS et al., 2009).

Segundo Doorenbos; Kassam (1979), dependendo do clima, a quantidade de água que a cana-de-açúcar necessita varia de 1.500 e 2.500 mm por ano. Assim, segundo Dantas Neto et al. (2006), para se obter altas produtividades em regiões onde a chuva não atende à demanda de água pela cultura, o uso da tecnologia de irrigação é imprescindível. De acordo com Inman-Bamber; Smith (2005), precipitação pluvial anual a partir de 1.000 mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções na cana-de-açúcar.

Para quantificar os benefícios econômicos da irrigação, é necessário saber quantificar o aumento esperado na produtividade em função do aumento da água aplicada. A representação gráfica ou matemática desta relação é denominada função de produção “água-cultura”.

De acordo com Bernardo (2006), define-se como função de produção a relação técnica entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo qualquer e a produtividade física possível de se obter com a tecnologia existente. Segundo Doorenbos; Kassam (1979), a produtividade de uma cultura é função de complexos processos biológicos, fisiológicos, físicos e químicos, os quais são determinados pelas condições ambientais (clima, solo e água) e por fatores genéticos da

própria cultura. Uma função de produção “água-cultura” típica é quando se relaciona a lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura versus a produtividade comercial (BERNARDO, 2006).

Chaves et al. (2008) citam que a deficiência hídrica afeta vários aspectos do metabolismo da cana-de-açúcar, em especial a fotossíntese. A fotossíntese das plantas é limitada pela restrição da abertura estomática, em condição de déficit hídrico (YORDANOV et al., 2003). Essa resposta adaptativa é promovida pelo fechamento parcial dos estômatos, que também afeta a disponibilidade de substrato (CO<sub>2</sub>) para a fotossíntese (FLEXAS et al. 2006; YORDANOV et al., 2003). Esse processo fisiológico vital para as plantas é então comprometido em condição de déficit hídrico, ocasionando decréscimos na produção de carboidratos que posteriormente seriam armazenados (SINGELS et al., 2005).

Segundo Inman-Bamber; Smith (2005), para atingir alta produção de sacarose, a planta precisa de temperatura e umidade adequadas para permitir o máximo crescimento na fase vegetativa, seguida de restrição hídrica ou térmica para favorecer o acúmulo de sacarose no colmo na época de corte.

A síntese e o acúmulo rápido de açúcares acontecem durante a fase de maturação. Por isso, o crescimento vegetativo é reduzido nesta fase. Conforme a maturação avança, açúcares simples (monossacarídeo, frutose e glicose) são convertidos em sacarose (um dissacarídeo). A maturação da cana procede de baixo para cima e, desse modo, a parte inferior contém mais açúcares do que a porção superior (INMAN-BAMBER et al., 2009; LISSON et al., 2005; MOORE, 2005).

Farias et al. (2009), em estudo realizado no Tabuleiro Costeiro Paraibano, analisaram o efeito de lâminas de água de irrigação (lâmina máxima de 1.221 mm, correspondente a 100% da ETc) na qualidade industrial da cana-de-açúcar, observando forte correlação entre as variáveis. Houve tendência de aumento dos sólidos solúveis totais (°Brix) para maiores valores de lâmina de água aplicada, assim como para Pol (%) e ATR (açúcares totais recuperáveis).

No entanto, cuidados devem ser tomados quando se utiliza a leitura da Pol para se determinar o rendimento industrial da cana-de-açúcar, devido à presença, no caldo, de outras substâncias opticamente ativas, como a dextrana (polímero sintetizado a partir da sacarose), além da sacarose. Essas substâncias promovem o aumento do desvio da luz polarizada para a direita, promovendo super estimativas dos teores de sacarose, o que compromete toda a avaliação da qualidade da matéria-prima no sistema de remuneração e avaliação das indústrias, visto que se contabiliza maior entrada de

sacarose na indústria do que realmente ocorre (CALDAS; SANTOS, 2010; SOLOMON, 2009).

A presença de dextrana nos colmos de cana-de-açúcar, além de interferir na leitura da *pol*, promove perdas de sacarose no processo industrial, que pode decorrer de vários fatores, dentre eles, maturação dos colmos, altas temperaturas ( $>40$  °C) e umidade relativa do ar, além do excesso de chuvas e encharcamento do solo, sendo a sua formação crescente com o tempo decorrido entre a colheita e a moagem dos colmos (CLARKE et al., 1980; SINGH et al., 2008; SOLOMON, 2009; UPPAL et al., 2008). Clarke et al., (1980) estimaram a perda de sacarose devido à formação de dextrana e concluíram que cada 1% de dextrana produzida representa 0,4% de perda de sacarose.

Diante do exposto, no presente trabalho objetivou-se encontrar as relações entre lâmina de água (chuva e irrigação) e produtividades de colmos e de açúcares (por tonelada de colmos e por hectare); determinar as lâminas de máxima produtividade física, de máximo rendimento econômico e de máximo rendimento industrial da cana-de-açúcar, para as condições edafoclimáticas no Norte de Minas Gerais; e determinar a relação existente entre a lâmina de água e a formação de dextrana no caldo da cana-de-açúcar.

## 1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em outubro de 2010 na fazenda pertencente à SADA Bioenergia e Agricultura, localizada no município de Jaíba, latitude 15° 12' S, longitude 43° 56' W e altitude de 478 m, em uma área irrigada, com cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) cultivar RB 86-7515, de ciclo tardio, no quarto ciclo (terceira soqueira). O solo local é classificado como Neossolo Quartzarênico, com baixa fertilidade natural e pequena capacidade de retenção de água. Os tratos culturais (capinas, adubação, controle fitossanitário) no decorrer do ciclo foram realizados conforme as recomendações da Fazenda, com objetivo de maximizar a produtividade.

O equipamento de irrigação utilizado foi um sistema de aspersão do tipo pivô central, da marca Valley, modelo 4865-8000 que, operando em regulagem do percentímetro em 100%, à velocidade máxima de 264 m h<sup>-1</sup> e vazão de 246 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, aplicava uma lâmina de 3,92 mm por volta. O equipamento é dotado de linha lateral de 428 m de comprimento, onde estão dispostos os emissores do tipo difusor, da marca Senninger, que trabalham com válvulas reguladoras de pressão de saída de 140 kPa, irrigando uma área de, aproximadamente, 57 ha. A água de irrigação era captada nos canais do Distrito de Irrigação de Jaíba (DIJ), oriunda do Rio São Francisco.

O manejo da irrigação foi realizado com auxílio do aplicativo *Irriger*<sup>®</sup> versão 3.0, com o qual se determinou a demanda hídrica da cana-de-açúcar (ETc), utilizando-se coeficientes de ajuste (coeficiente da cultura “kc”, de localização da irrigação “kl” e do solo “ks”) sobre a evapotranspiração de referência (ETo). A lâmina bruta de irrigação foi calculada por meio de um balanço hídrico, considerando-se a profundidade do sistema radicular, em que as entradas de água foram a irrigação e precipitação pluvial efetiva e as saídas, a evapotranspiração da cultura (ETc) e percolação.

As lâminas brutas foram calculadas pelo somatório das ETc no intervalo entre irrigações, indicando a necessidade hídrica da cultura considerando-se a uniformidade de aplicação do sistema e a área adequadamente irrigada de acordo com o valor comercial da cultura.

O método de estimativa da ETo pelo aplicativo *Irriger*<sup>®</sup>, com base nos elementos meteorológicos disponíveis (radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar), foi o modelo de Penman-Monteith-FAO (ALLEN *et al.*, 1998). Os dados meteorológicos utilizados para a realização do experimento foram obtidos em estação meteorológica automática da marca Davis, modelo Vantage Pro 2, instalada na área experimental.

As propriedades do solo e as características da cultura cadastradas no aplicativo, utilizadas para o manejo da irrigação estão apresentadas no Quadro 1.1.

**Quadro 1.1** – Propriedades do solo e características da cultura

<b>Solo</b>						
<b>Profundidade</b>	<sup>1</sup> <b>CC</b>	<sup>2</sup> <b>PMP</b>	<b>Densidade</b>	<b>Argila</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>
(cm)	(%)	(%)	(g cm <sup>-3</sup> )	(%)	(%)	(%)
0-25	8,1	3,5	1,6	12	83	5
25-50	6,0	3,0	1,6	12	82	6
<b>Cultura</b>						
<b>Ciclo</b>	<b>Fase</b>	<b>Duração</b>	<sup>3</sup> <b>Kc</b>	<sup>4</sup> <b>Z</b>	<b>Área</b>	<sup>5</sup> <b>f</b>
		(dias)		(cm)	<b>Sombreada</b>	
				(%)		
Soca 3	Brotação	20	0,40	0,3	15	0,7
Soca 3	Perfilhamento	80	0,70	0,5	50	0,7
Soca 3	Desenvolvimento	240	1,25	0,5	100	0,7
Soca 3	Maturação	27	0,80	0,5	100	0,7

<sup>1</sup>Capacidade de campo a 10 kPa; <sup>2</sup>Ponto de murcha permanente; <sup>3</sup>Coefficiente cultural; <sup>4</sup>Profundidade efetiva do sistema radicular; <sup>5</sup>Fator de disponibilidade hídrica.

A água do solo foi monitorada com a determinação de umidade, em peso, pelo método padrão de estufa, com amostragens mensais, utilizando trado holandês, balança analítica e estufa, durante a aplicação dos tratamentos, de modo a permitir o acompanhamento do balanço hídrico do solo que, comparado ao consumo de água pela cultura, estimado com o aplicativo, garantiu a aferição do método.

Para a aplicação dos tratamentos, trocaram-se os bocais dos emissores, de modo que, em cada vão entre torres do pivô, fosse aplicada uma lâmina específica, como é apresentado no Quadro 1.2. O experimento foi montado no delineamento em faixas, tendo seis tratamentos e três repetições.

**Quadro 1.2** – Tratamentos e lâminas aplicadas, precipitação efetiva, lâminas totais de irrigação aplicadas e lâminas totais no ciclo da cultura em cada tratamento

<b>Tratamento</b>	<b>Lâmina percentual nominal</b>	<b>Lâmina percentual aplicada</b>	<b>Precipitação pluvial efetiva</b>	<b>Irrigação total</b>	<b>Lâmina total</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
T6	150	156,3	348,0	1.530,4	1.878,4
T5	125	126,5	365,4	1.240,1	1.605,5
T4	100	100,0	393,0	979,6	1.372,6
T3	75	73,4	419,2	719,2	1.138,4
T2	50	52,2	432,8	511,9	944,7
T1	25	24,7	435,7	242,2	677,9

Cada parcela tinha 12m de comprimento com 5 fileiras de plantio, tendo como área útil as três fileiras centrais com comprimento de 10m. Considerou-se, para o cálculo da lâmina total de água aplicada no ciclo, a soma entre a irrigação total e a precipitação efetiva. A irrigação total foi obtida pela soma das irrigações realizadas. A precipitação efetiva foi calculada subtraindo-se da precipitação total, o excesso, que é a soma do escoamento superficial calculado pelo modelo SCS-USDA (PRUSKI, 2009) e da lâmina percolada, calculada a cada evento de irrigação por intermédio do balanço hídrico diário. Não se utilizou valores de precipitação efetiva maiores que a capacidade total de armazenamento de água do solo (33,3 mm).

Foram determinados a produtividade de colmos e o rendimento industrial da cana-de-açúcar, com seus valores expressos em ATR e os teores de dextrana do caldo, como segue:

As colheitas dos colmos foram realizadas manualmente, cortando-se uma fileira de 10 metros lineares nas parcelas úteis de cada tratamento. Após cada colheita, as amostras foram pesadas em dinamômetro e determinadas as massas (kg) da produção de cada parcela de 15 m<sup>2</sup>, sendo o resultado obtido convertido em toneladas de cana por hectare (t ha<sup>-1</sup>), considerando-se o espaçamento entre fileiras de 1,50 m. Em cada parcela foram retirados cinco colmos, aleatoriamente, e enviados ao laboratório para a realização das análises de rendimento industrial.

A extração do caldo, a pesagem do bagaço úmido e as leituras de brix e de pol ocorreram imediatamente após a desintegração e homogeneização das amostras. O caldo foi extraído em prensa hidráulica com pressão constante de 24,5 MPa, sobre a amostra, durante um minuto.

O peso do bagaço (bolo) úmido utilizado para o cálculo da fibra da cana (F) foi obtido em balança semianalítica de 500g, com aproximação de mais ou menos 0,5g.

A determinação do Brix em laboratório (teor de sólidos solúveis em percentagem, em massa de caldo) foi realizada em refratômetro digital, de leitura automática, com correção automática de temperatura e resolução máxima de 0,1° Brix, com o valor final corrigido e expresso a 20°C.

A leitura sacarimétrica do caldo foi determinada em sacarímetro digital automático, com peso normal igual a 26 g, resolução de 0,01°Z (um centésimo de grau de açúcar) e calibrado a 20°C, em comprimento de onda de 587 e 589,4 nm, provido de tubo polarimétrico de fluxo contínuo, após clarificação do caldo com mistura clarificante à base de alumínio.

Com os valores de brix, pol e peso do bagaço úmido foram determinados por meio de cálculos, descritos no manual do CONSECANA (2006), os açúcares totais recuperáveis (ATR) em kg t<sup>-1</sup>. Para a determinação da dextrana, seguiu-se o método HAZE/ICUMSA (CTC, 2005), com os resultados expressos em mg kg<sup>-1</sup> (miligramas de dextrana por kilograma de açúcar).

A relação entre as variáveis dependentes (produtividade) e as independentes (lâmina de água aplicada) foi obtida por análise de regressão do tipo polinomial de segundo grau (Equação 1.1), conforme sugerido por Bernardo (2006) e Frizzone e Andrade Júnior (2005).

$$\hat{P} = a + bL + cL^2 \quad (1.1)$$

Em que,

$\hat{P}$  = Produtividade da cultura (t ha<sup>-1</sup>);

$L$  = lâmina total aplicada (mm); e

$a$ ,  $b$  e  $c$  = coeficientes de ajuste da equação de regressão.

Para determinar a produtividade máxima, em relação à lâmina aplicada, a Equação 1 foi derivada em relação à lâmina aplicada, igualando-se o resultado a zero, como apresentado nas Equações 1.2 e 1.3.

$$\frac{\partial P}{\partial L} = b + 2 \cdot c \cdot L = 0 \quad (1.2)$$

$$L_{mpf} = -\frac{b}{2c} \quad (1.3)$$

Em que,

$L_{mpf}$  = lâmina que resulta na máxima produtividade física (mm).

Para determinar a lâmina de irrigação recomendável para a cultura da cana-de-açúcar que forneça o ponto ótimo de rendimento econômico ( $L_{mre}$ ) foi estimado, inicialmente, o rendimento (lucro) em relação à lâmina aplicada, utilizando a função representada pela Equação 1.4 e, posteriormente, substituindo-se a Equação 1.3 na Equação 1.5, resultando na Equação 1.6.

$$R = p_p \cdot P - (p_a \cdot L + C_f) \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial L} = \frac{\partial P}{\partial L} p_p - p_a \quad (1.5)$$

$$L_{mre} = \frac{p_a - b \cdot p_p}{2c \cdot p_p} \quad (1.6)$$

Em que,

$L_{mre}$  = lâmina de máximo rendimento econômico (mm);

$a$ ,  $b$  e  $c$  = coeficientes de ajuste da Equação de regressão;

$R$  = rendimento (R\$ ha<sup>-1</sup>);

$p_p$  = preço do produto (R\$ t<sup>-1</sup>);

$p_a$  = preço da água de irrigação (R\$ mm<sup>-1</sup>); e

$C_f$  = custos fixos do sistema de irrigação para o ano agrícola em estudo (R\$ ha<sup>-1</sup>).

O preço do produto ( $p_p$ ) foi obtido na União dos Produtores de Bioenergia (UDOP, 2011), considerando-se a média dos preços mensais praticados entre os meses de novembro de 2010 a outubro de 2011. O preço da água ( $p_a$ ) foi obtido pela soma dos custos de energia elétrica ( $CEE$ ) e tarifa de água do perímetro irrigado ( $TAP$ ) a partir de contas de energia elétrica e água, fornecidas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e pelo Distrito de Irrigação de Jaíba (DIJ), respectivamente. Os demais custos foram obtidos junto à administração da Fazenda. O custo unitário de lâmina de irrigação totalizou em R\$ 1,56 mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>.

Os custos fixos de irrigação ( $C_f$ ), para o ano agrícola em estudo, foram obtidos a partir do valor de aquisição do equipamento, dividido pela sua vida útil (15 anos) e pela área irrigada, somando-se os custos da mão-de-obra empregada na irrigação.

Os valores de compra dos equipamentos (Pivôs-centrais) foram consultados junto à administração da Fazenda Sada Bioenergia e Agricultura, em Reais (R\$). Foram computados os custos fixos ( $C_f$ ) de depreciação dos componentes do sistema (DC) e dos juros sobre o capital investido (JC). Para o cálculo dos custos de depreciação dos equipamentos, foi utilizada a Equação 1.7 (FERNANDES et al., 2008).

$$DC = \frac{[(VAC) - (0,2VAC)]}{VU} \quad (1.7)$$

Em que,

DC = depreciação do componente do sistema (R\$);

VAC = valor de aquisição do componente (R\$);

0,2 VAC = valor residual ou de sucata (R\$); e

VU = vida útil (anos).

O valor residual ou de sucata foi calculado para 20% do valor de compra do componente. Os valores de vida útil dos equipamentos foram obtidos de Fernandes et al. (2008) e Frizzone; Andrade Júnior (2005).

O custo de oportunidade foi calculado como sendo o custo dos juros do mercado financeiro sobre o capital investido, conforme sugerido por Frizzone; Andrade Júnior (2005).

O custo dos juros sobre o capital investido (JC) foi calculado considerando-se a taxa de 7,2% ao ano, aplicados sobre o valor de aquisição dos equipamentos, conforme Equação 1.8.

$$JC = TAJ \times VAE \quad (1.8)$$

Em que,

JC = Juros sobre o capital investido (R\$);

TAJ = Taxa anual de juros (%);

VAE = Valor de aquisição dos equipamentos (R\$).

Para obtenção dos dados de campo, foram totalizadas as lâminas aplicadas em todo o ciclo da cultura, para cada um dos tratamentos descritos no Quadro 1.2. A partir

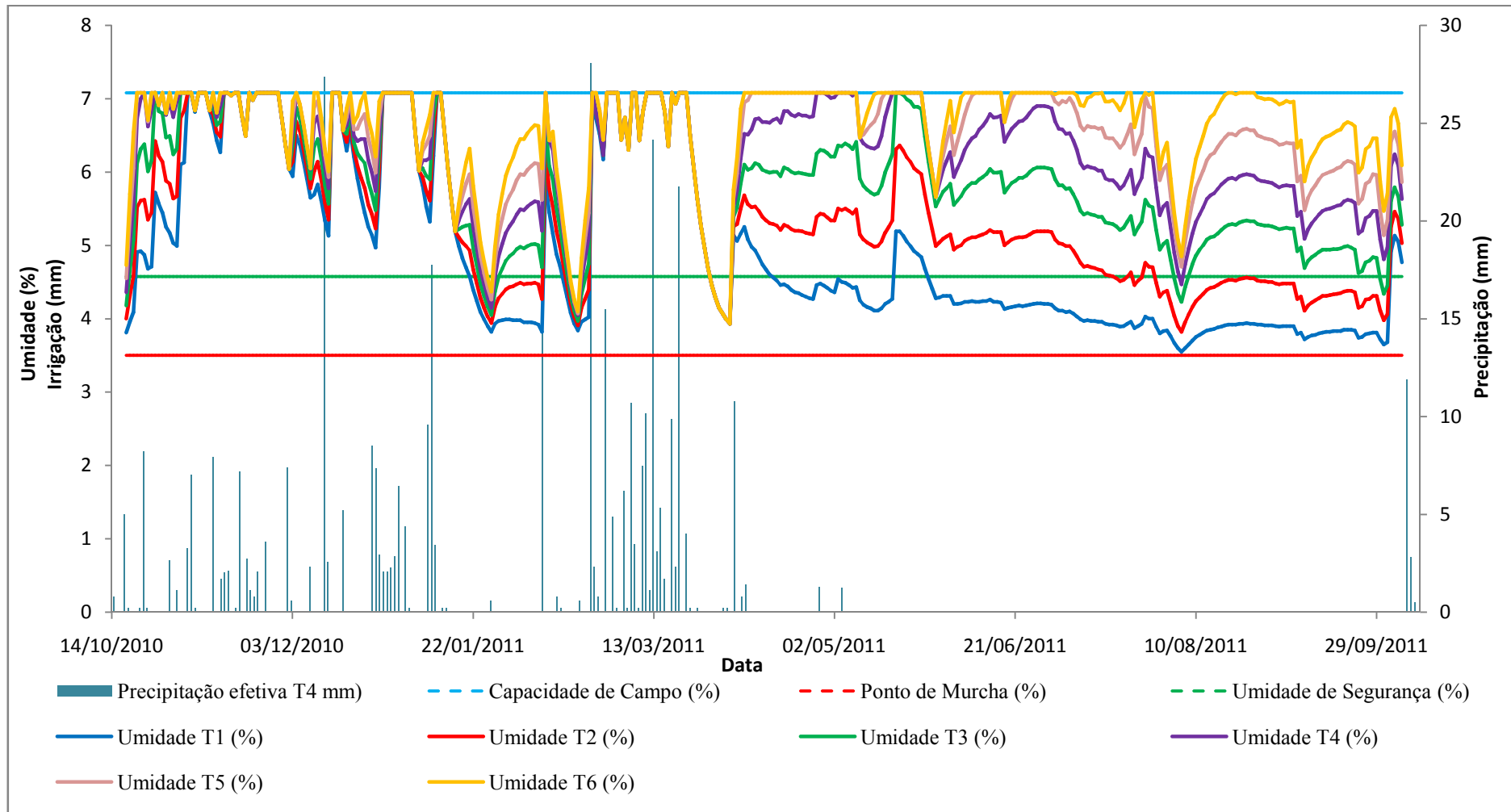
dos dados obtidos, foi gerada uma Equação (função de produção) por análise de regressão de segundo grau para obtenção dos coeficientes de ajuste  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

Com os dados de produtividade e os custos relacionados à irrigação da cana-de-açúcar, calculou-se as lâminas para obtenção da máxima produtividade física ( $L_{mpf}$ ), e do máximo rendimento econômico ( $L_{mre}$ ) considerando-se a produtividade de colmos e de açúcares.

Os valores obtidos nas repetições foram submetidos a análises de variância e, posteriormente, elaboradas regressões com uso do aplicativo SAEG 9.1. Os coeficientes encontrados para as equações de regressão foram submetidos ao teste t, com posterior correção, considerando-se o Quadrado Médio do Resíduo e os Graus de Liberdade da ANOVA e o Quadrado Médio Independente da Regressão. Foram adicionados os Intervalos de Confiança da Regressão, ao nível de 95% de probabilidade.

### **1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Figura 1.1 está apresentado o balanço hídrico, que representa o manejo da irrigação, os limites superior (capacidade de campo) e inferior (ponto de murcha permanente) de armazenamento de água no solo, a precipitação efetiva e a umidade do solo para os tratamentos durante a safra 2010/2011.

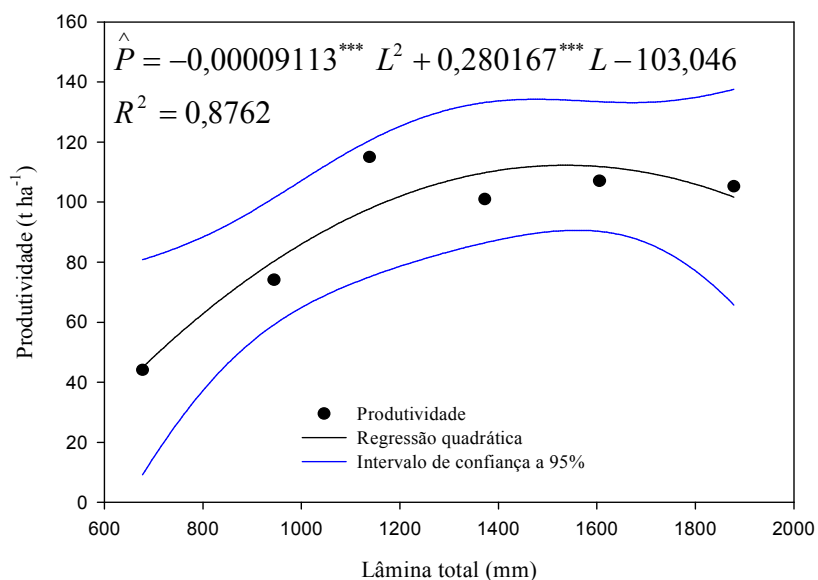


**Figura 1.1** – Balanço hídrico e limites de armazenamento de água no solo para o manejo da cultura da cana-de-açúcar durante a safra 2010/2011.

Observa-se que o período chuvoso encerrou-se no dia 03/05/2011, com a última chuva expressiva (10,8 mm) ocorrendo em 04/04/2011, fazendo com que a cultura ficasse totalmente dependente da irrigação, para o suprimento de água, durante 181 dias. Depois do período chuvoso, a umidade do solo chegou à umidade de segurança (fator  $f$ ) no dia 05/04 para o tratamento T1, permanecendo até o dia 19/05 abaixo desta umidade, voltando a atingir a umidade de segurança no dia 28/05 e permanecendo sob deficiência hídrica por 128 dias, até o final do período seco (03/10).

A umidade do solo do tratamento T2 permaneceu abaixo da umidade de segurança por 72 dias (18/07 a 02/10). Para os demais tratamentos, houve pequenos períodos (até seis dias) em que a umidade do solo esteve abaixo da umidade de segurança. Entre os dias 28/07 e 06/08, o equipamento sofreu um problema técnico e não funcionou, o que promoveu queda acentuada de umidade do solo para todos os tratamentos. Os valores de umidade do solo medidas, para aferição, foram próximos dos calculados pelo aplicativo.

A Figura 1.2 apresenta a relação entre a produtividade da cultura e a lâmina de água aplicada no ciclo. Observa-se um crescimento da produtividade à medida que se aumenta a lâmina aplicada, até atingir um valor máximo de  $112,3 \text{ t ha}^{-1}$ , com a aplicação de 1.537 mm. Estes valores representam a lâmina de máxima produtividade física ( $L_{mpf}$ ), calculada pela Equação 1.3. Para se atingir a produtividade máxima, são necessários  $136,9 \text{ m}^3$  de água para uma tonelada de cana.

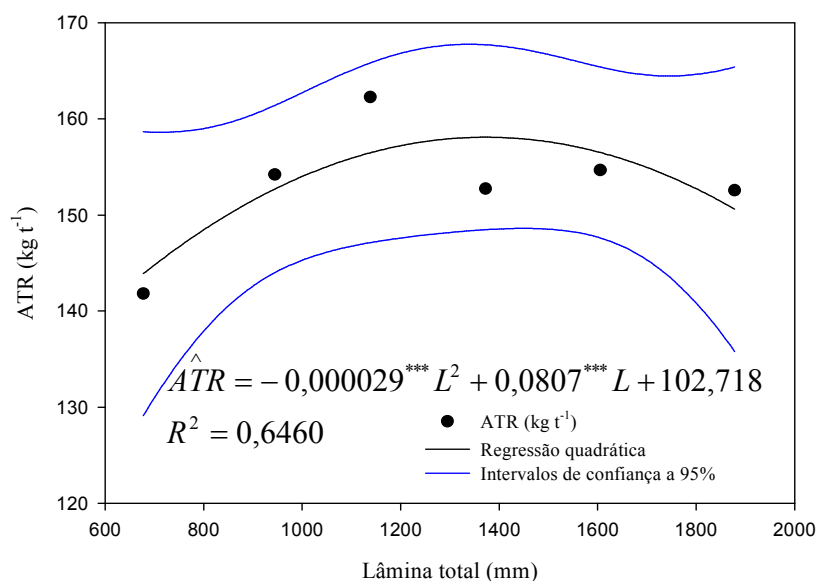


\*\*\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”.

**Figura 1.2** – Produtividade de colmos ( $\text{t ha}^{-1}$ ) em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

No entanto, a produtividade máxima não representa o maior lucro. A lâmina de máximo rendimento econômico ( $L_{mre}$ ), calculada pela Equação 1.6, foi de 1.334 mm, com a produtividade de 108,5 t ha<sup>-1</sup> para um valor do preço de água ( $p_a$ ) igual a R\$ 1,56 mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> e preço do produto ( $p_p$ ) de R\$ 42,0 por tonelada de colmos.

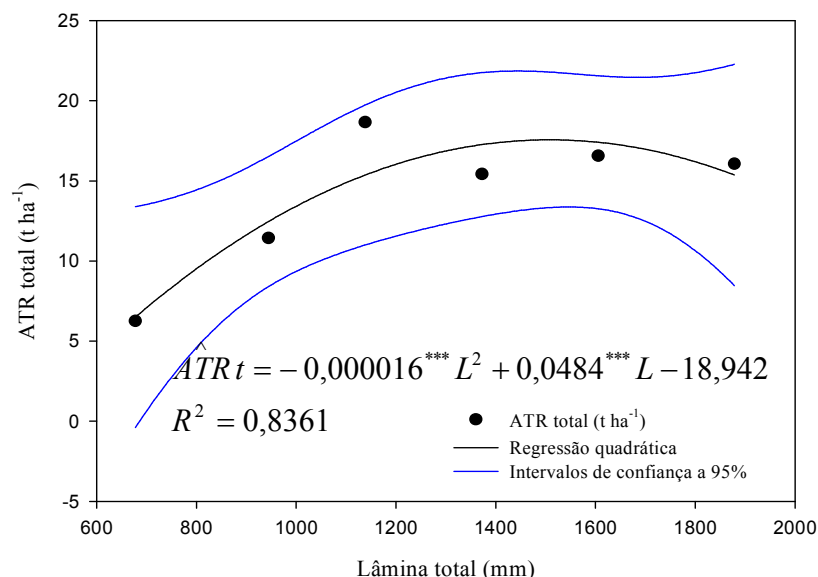
Na Figura 1.3, é apresentado o rendimento de açúcares, em termos de ATR, em função da lâmina de água. A lâmina que proporcionou maior rendimento de açúcares foi de 1.373 mm com 158,1 kg de açúcares por tonelada de colmos. A partir deste valor, o teor de açúcares é reduzido, devido à maior quantidade de água que está disponível para a cultura, concordando com a afirmação de Bernardo (2006), que classifica o estágio de maturação, como responsivo positivamente ao déficit hídrico, visto que, o teor de sacarose costuma ser afetado adversamente pelo excesso de água no estágio de maturação. Os valores encontrados no presente trabalho são superiores aos encontrados por Farias et al. (2009), com valores máximos de ATR da ordem de 147 kg t<sup>-1</sup>, para a cultivar SP 79-1011, de ciclo precoce, cultivada no Tabuleiro Costeiro Paraibano.



\*\*\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”

**Figura 1.3** – Rendimento de açúcares – ATR (kg t<sup>-1</sup>) em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Com o objetivo de otimizar o uso do solo, deve-se buscar a lâmina que forneça uma maior quantidade de açúcares por unidade de área. Assim, calculou-se a lâmina para o rendimento de açúcares por unidade de área – ATR total (t ha<sup>-1</sup>), em que o máximo valor foi atingido com a lâmina de 1.508 mm com 17,6 toneladas de açúcar por hectare (Figura 1.4).



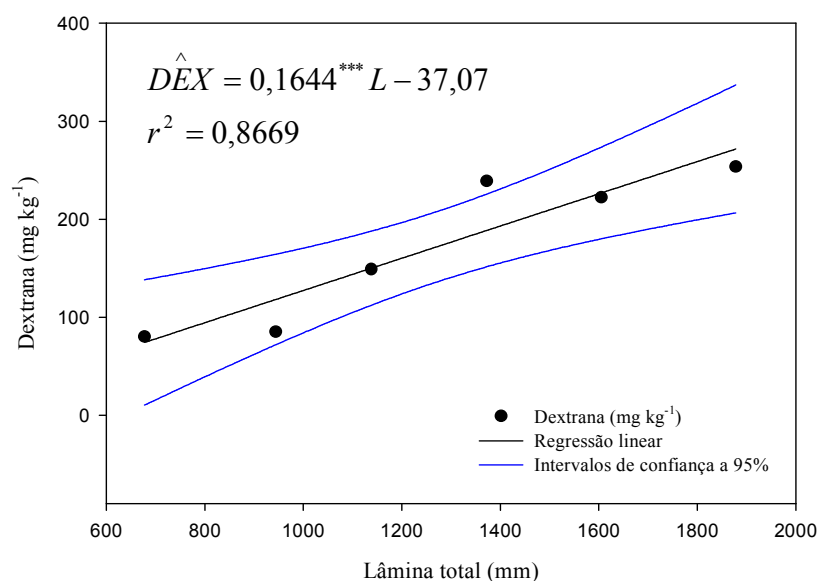
**Figura 1.4** – Rendimento de açúcares – ATR total ( $t\ ha^{-1}$ ) em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Outra maneira de buscar a otimização do uso da área, promovendo, ainda, o uso eficiente de água e energia elétrica, é encontrar a lâmina que proporcione o maior retorno econômico de açúcares. Do mesmo modo que se fez para encontrar o valor de *Lmre* (lâmina de máximo rendimento econômico) para a produtividade de colmos, calculou-se a lâmina de máximo rendimento econômico de açúcares. Para se obter o rendimento econômico de açúcares, de 17,4 toneladas de açúcar (ATR) por hectare, é necessária uma lâmina de 1.406 mm no ciclo da cultura, ou seja, são necessários  $808\ m^3$  de água para se produzir uma tonelada de açúcar. Este valor deve ser indicado como referência para a recomendação de irrigação da cana-de-açúcar de ciclo tardio no semi-árido e representa a lâmina de maior retorno econômico para a indústria, uma vez que os açúcares são o principal produto de interesse econômico, seja para a produção de etanol, açúcar ou aguardente.

Farias et al. (2009) encontraram rendimento de açúcares por unidade de área inferiores ( $13,0\ t\ ha^{-1}$ ) para lâmina total de 1.221 mm (100% de ETc).

Na Figura 1.5 é apresentada a tendência de formação de dextrana em função da lâmina de água recebida pela cultura durante o ciclo. Observa-se aumento dos teores de dextrana à medida que se aumenta a quantidade de água aplicada, com valores médios atingindo mais de  $200\ mg\ kg^{-1}$ . A Copersucar estabelece valores máximos de dextrana de até 100 e  $150\ mg\ kg^{-1}$  para os açúcares dos tipos 2 e 3, respectivamente,

comercializados no Brasil (AQUINO, 2009). O tratamento T3 apresentou valor superior a  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  e os tratamentos T4, T5 e T6 superaram os  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ .



\*\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”

**Figura 1.5** – Dextrana ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Durante o experimento, observou-se alagamento das parcelas que receberam maiores quantidades de água, principalmente nos tratamentos T5 e T6. De acordo com Solomon (2009), o encharcamento do solo provoca aumento dos teores de dextrana no caldo, devido ao favorecimento da proliferação de bactérias do gênero *Leuconostoc sp.*, que estão relacionadas à formação de dextrana.

É importante para as indústrias de etanol e, principalmente de açúcar, introduzirem as análises de dextrana na rotina laboratorial, para verificarem a sua ocorrência e, no caso de conteúdos maiores que os aceitáveis, reduzirem as lâminas de irrigação.

#### 1.4. CONCLUSÕES

Com os resultados observados, pode-se concluir que, para as condições experimentais, a lâmina que proporcionou a maior produtividade de colmos de cana-de-açúcar é de 1.537 mm, para uma produtividade de 112,3 t ha<sup>-1</sup>, ou seja, são necessários 136,9 m<sup>3</sup> de água para se produzir uma tonelada de cana. A lâmina de maior rendimento econômico foi de 1.334 mm para uma produtividade de 108,5 t ha<sup>-1</sup>. A lâmina que proporcionou a maior produtividade de açúcares por tonelada de colmos foi de 1.373 mm para uma produtividade de 158,1 kg t<sup>-1</sup>. A lâmina que proporcionou a maior produtividade de açúcares por hectare foi de 1.508 mm para uma produtividade de 17,56 t ha<sup>-1</sup>. O melhor rendimento econômico, em termos de açúcares por unidade de área, foi de 17,4 t ha<sup>-1</sup>, com fornecimento de 1.406 mm de água (lâmina recomendada), resultando na necessidade de 808 m<sup>3</sup> de água para se produzir uma tonelada de açúcar. Lâminas acima de 1.000 mm no ciclo da cultura promoveram teores de dextrana acima dos limites estabelecidos para produção de açúcar. Recomenda-se para as indústrias de etanol e, principalmente de açúcar, introduzirem as análises de dextrana na rotina laboratorial.

## 1.5. BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

AQUINO, F.W.B. de. **Dextranas em açúcares e em aguardentes de cana**. Tese (Doutorado em Ciência – Química analítica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 128 f. 2009.

BERNARDO, S. **Manejo da irrigação na cana-de-açúcar**. Palestra no XVI CONIRD. Goiânia-GO. 2006. 11p. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana\\_irrigada\\_producao\\_000fizvd3t102wyiv802hvm3j1wle6b8.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3j1wle6b8.pdf)>. Acesso em: 01 de mai, 2011.

CALDAS, C.; SANTOS, F. **Controle de qualidade nas indústrias de açúcar e álcool**. In SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). Cana-de-açúcar: Bioenergia, açúcar e álcool – Tecnologias e perspectivas. Viçosa: UFV, cap 13, p.357-368, 2010.

CHAVES, M.M; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, p. 551-560, 2008.

CLARKE M.A.; ROBERTS E.J.; GODSHALL M.A.; BRANNAN M.A.; CARPENTER F.G.; COLL E.E. Sucross loss in the manufacture of the cane sugar. **Proceedings...** International Society of Sugar Cane Technology, p.2192-2203, 1980.

CONSECANA – CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de Instruções**. CONSECANA-SP, Piracicaba, 5ª ed., 2006. 200 p.

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. **Determinação de dextrana em caldos**. In.: Manual de controle químico da fabricação de açúcar. Piracicaba, p.12-17, 2005.

DANTAS NETO, J.; FIGUERDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; 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**, v.10, n.2, p.283-288, 2006.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 33).

FARIAS, C.H. de A.; FERNANDES, P.D.; GHEYI, H.R.; DANTAS NETO, J. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro Paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol.13, n.4, p.419-428, 2009.

FERNANDES, A. L. T.; SANTINATO, R.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. 2 ed. Uberaba: O Lutador. 2008. 476 p.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; BOTA, J. GALMES, J.; HENKLE, M.; MARTINEZ-CANELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO<sub>2</sub> concentration. **New Phytologist**, v.172, p. 73-82, 2006.

FRIZZONE, J.A.; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Brasília: EMBRAPA. 2005. 626p.

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

INMAN-BAMBER, N.G.; BONNETT, G.D.; SPILLMAN, M.F.; HEWITT, M.L.; JINGSHENG X. Source–sink differences in genotypes and water regimes influencing sucrose accumulation in sugarcane stalks. **Crop & Pasture Science**, v.60, n.4, p.316-327, 2009.

JALOTA, S.K.; SOOD, A.G.B.S.; CHAHAL, B.U. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) – wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit

irrigation, soil texture and precipitation. **Agricultural Water Management**, v.84, p.137-146, 2006.

KARATAS, B.S.; AKKUZU, E.; UNAL, H.B.; ASIK, S.; AVCI, M. Using Satellite remote sensing to asses irrigation performance in water user Associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. **Agricultural Water Management**, v. 96, p.982-990, 2009.

LISSON, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, v.92, p.321-335, 2005.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELLO, J.M.; JUAN, J.A. DE; BALLESTEROS, R.; DOMÍNGUEZ, A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. **Agricultural Water Management**, v.98, p.190-198, 2010.

MOORE, P.H. Integration of sucrose accumulation processes across hierarchical scales: towards developing an understanding of the genetic-crop continuum. **Field Crops Research**, v.92, p.119-135, 2005.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; EHOLPANKULOV, E.D.; INCHEKNOVA, O.P.; TEODORO, P.R.; HORST, M.G. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. **Agricultural Water Management**, v. 96, p.723-735, 2009.

PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água – Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2ª Ed. Viçosa: UFV. 2009. 279 p.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v.92, p. 291-303, 2005.

SINGH, P.; SOLOMON, S.; SHRIVASTAVA A.K.; PRAJAPATI C.P.; SINGH R.K. Post-harvest deterioration of sugarcane and its relationship with the activities of invertase and dextransucrase during late-crushing season in sub-tropics. **Sugar Tech**, v.10, n.2, p.133-136, 2008.

SOLOMON, S. Post-harvest deterioration of sugarcane. **Sugar Tech**, v.2, n.11, p.109-123, 2009.

UDOP - União dos Produtores de Bioenergia. **Indicadores de Mercado:** Cana-de-açúcar. Disponível em: <[http://www.udop.com.br/graficos/cana\\_campo\\_pr.php](http://www.udop.com.br/graficos/cana_campo_pr.php)> Acesso em: 21 de nov. 2011.

UPPAL, S.K.; BHATIA, S.; THIND, K.S. Pre milling cane preparation for high sugar recovery and reduction of post harvest losses in sugarcane. **Sugar Tech**, v.4, n.10, p.346-349, 2008.

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

## **ARTIGO 2**

### **INDICADORES MORFO-FISIOLÓGICOS DO ESTRESSE HÍDRICO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO**

#### **RESUMO**

O presente trabalho foi desenvolvido, objetivando-se encontrar as relações entre lâmina de água (chuva e irrigação) e indicadores morfológico (índice de área foliar) e fisiológicos do estresse hídrico (temperatura foliar, potencial hídrico foliar e índice de clorofila nas folhas) na cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação. O experimento foi instalado em outubro de 2010 em Jaíba/MG, em uma área irrigada por pivô central, com cana-de-açúcar no quarto ciclo. Para a aplicação dos tratamentos, trocaram-se os bocais dos emissores, em cada vão entre torres, de modo que fossem aplicadas as lâminas referentes a 25, 50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração da cultura, com o manejo da irrigação realizado para atender a demanda de 100%. Foram medidos o índice de área foliar, o potencial hídrico foliar, a temperatura foliar e o índice de clorofila nas folhas. Os valores obtidos foram submetidos a análises de variância e, posteriormente, elaboradas regressões. Diante dos resultados, foi possível concluir que houve tendência de aumento do índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar à medida que se aumentou a lâmina de irrigação no ciclo da cultura; o aumento do IAF foi mais acentuado nos tratamentos que receberam mais água; o potencial hídrico foliar foi menor para menores lâminas de irrigação, com destaque para o tratamento que recebeu menos água (25%); a temperatura foliar foi próxima à temperatura do ar nos tratamentos que receberam as maiores lâminas (100 a 150%), com tendência de aumento da diferença entre a temperatura das folhas, à medida que se reduziu o suprimento hídrico; houve tendência de aumento do índice de clorofila (ICF) à medida que se aumentou as lâminas, com leve queda nos tratamentos que receberam lâminas maiores que 100% da ETc.

## **PAPER 2**

### **MORPHO-PHYSIOLOGICAL INDICATORS OF WATER STRESS ON SUGARCANE AS A FUNCTION OF IRRIGATION DEPTHS**

#### **ABSTRACT**

The present study was developed to evaluate relationships between the water depths (rain and irrigation) and morphological (leaf area index) and physiological indicators (leaf temperature, leaf water potential and chlorophyll content in leaves) of water stress on sugarcane subject to different irrigation levels. The experiment was installed in October 2010 in Jaíba/MG, Brazil, in an area irrigated by a center pivot system with sugarcane in the fourth cycle. For the treatments, emitter nozzles were exchanged in each vain between pivots so that the depths applied related to 25, 50, 75, 100, 125 and 150% of evapotranspiration, with the irrigation management performed to meet 100% of the demand. The factors of leaf area index, leaf water potential, leaf temperature and leaf chlorophyll index were measured. The values obtained were subjected to analysis of variance and subsequently developed regressions. From the results, it was concluded that there was a trend of increased leaf area index (LAI) for sugarcane as increasing the water depth in the crop cycle; the increase in LAI was more pronounced in treatments that received more water; leaf water potential was lesser for smaller irrigation depths, with emphasis on the treatment that received less water (25%); leaf temperature was close to the air temperature in the treatment receiving the highest depths (100 and 150%) with a trend for an increased difference between the temperature of the leaves as reducing the water supply; the chlorophyll index (ICF) tended to increase as increasing the depths, with a slight drop in treatments receiving depths greater than 100% of the ETc.

## 2.1. INTRODUÇÃO

O estresse hídrico geralmente é definido como um fator externo que exerce influência desvantajosa sobre a planta (SILVA; PINCELLI, 2010). O conceito de estresse está intimamente relacionado ao de tolerância ao estresse, que é a aptidão da planta para enfrentar um ambiente desfavorável. O déficit hídrico também pode ser definido como todo o conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Na cultura da cana-de-açúcar, a deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis por maiores danos à produção, principalmente por afetar a cultura, mesmo nas estações mais chuvosas, em decorrência de veranicos. No entanto, as plantas podem apresentar alguns mecanismos de tolerância ao estresse hídrico. Estes mecanismos podem variar entre as espécies e dentro das mesmas, sendo que geralmente a planta apresenta um conjunto de características que podem representar uma tolerância mais eficiente (LANDELL et al., 2010; SILVA et al., 2010; SILVA; PINCELLI, 2010).

Para relacionar parâmetros fisiológicos ao desenvolvimento das culturas pode-se citar o uso de termometria a infra-vermelho (IDSO et al., 1981; CLAWSON; BLAD, 1982; JACKSON et al., 1977), teor de clorofila nas folhas (DAWSON et al., 2003; CIGANDA et al., 2009) e monitoramento do estado hídrico da planta (MANTOVANI et al., 2009; SOARES et al., 2005).

A relação entre a temperatura do dossel de plantas e a disponibilidade de água no solo tem sido investigada pela termometria a infravermelho por diversos pesquisadores (IDSO et al., 1981; CLAWSON; BLAD, 1982), em busca por um índice térmico adequado para estabelecer o tempo de irrigação apropriado. Um dos primeiros índices estudados foi o grau dia de estresse, baseado na relação entre a diferença de temperatura do dossel e do ar com o rendimento e a necessidade de água pela cultura (JACKSON et al., 1977).

Sob estresse hídrico, uma planta apresenta temperatura foliar superior quando comparada à cultivada sob condições plenas de disponibilidade hídrica (TESTI et al., 2008). Trentin et al. (2011) observaram que a diferença de temperatura, entre as folhas de cana-de-açúcar e o ar, está intimamente associada ao processo de transpiração. À medida que esta aumenta, há uma redução na temperatura foliar devido à dissipação de energia na forma de calor latente. Assim, a temperatura foliar torna-se inferior à temperatura do ar.

De acordo com Gardner et al. (1981); Testi et al. (2008) e Jackson (1982) a temperatura das plantas de um dossel aumenta com o decréscimo da umidade do solo. Valores de desvio padrão da temperatura entre 0,3°C e 4,2°C foram encontrados para a cultura do milho irrigado e sob estresse hídrico, respectivamente. Fuchs; Tanner (1966) propuseram o uso de plantas controle bem irrigadas como referência para se avaliar o estado de água da planta, citando que a diferença de temperatura entre as plantas sob diferentes disponibilidades de água no solo e plantas controle pode ser usada para estabelecer um índice de nível de estresse. Lobo et al. (2004) estudaram o comportamento do feijoeiro irrigado sem restrição hídrica comparando-o com cinco níveis de estresse hídrico, determinando o momento de se irrigar quando a diferença de temperatura entre as plantas controle e os tratamentos atingiu 1, 2, 3, 4 e 5 °C. Concluíram que o melhor momento de se irrigar a cultura, durante o período reprodutivo, foi quando as temperaturas atingiram 3 a 4 ( $\pm 0,5$ ) °C acima da temperatura das plantas controle (plantas bem irrigadas).

O conhecimento das relações hídricas é fundamental para melhorar o manejo da cultura nas regiões tropicais, sobretudo em virtude do grande déficit hídrico existente em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Assim, o uso eficiente da água na irrigação é, provavelmente, a maneira mais eficaz de melhorar o manejo da cultura, garantindo que o estresse hídrico seja minimizado durante as fases críticas de desenvolvimento. No entanto, pode ocorrer estresse durante a fase de maturação para maximizar a produção de sacarose (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Uma técnica utilizada para estimativas da produtividade das culturas é pela relação existente entre o teor de clorofila nas folhas com o seu rendimento. Dawson et al. (2003) citam que a produção de matéria seca pelas culturas é limitada pela quantidade de clorofila, devido à forte relação deste pigmento com os processos fotossintéticos. Sendo assim, um deficiente teor de clorofila limita o desenvolvimento das plantas. Alguns parâmetros da cultura, como o teor de nitrogênio, índice de área foliar, trocas gasosas de CO<sub>2</sub>, radiação fotossinteticamente ativa absorvida e

produtividade têm sido relacionados com o seu teor de clorofila (WALTERS, 2003). Dawson et al. (2003) afirmam que o teor de clorofila é o indicador mais relevante para se prever a produtividade de uma cultura.

Técnicas destrutivas têm sido tradicionalmente usadas para determinação do teor de clorofila em plantas. Geralmente, elas envolvem muitas amostragens destrutivas, somadas a protocolos analíticos (CIGANDA et al., 2009), fazendo com que a estimativa do teor de clorofila seja um processo oneroso e laborioso. Com isso, necessita-se de métodos de estimativa precisos, não-destrutivos e simples para se determinar o teor de clorofila das culturas, tanto em escala de dossel como para folhas individuais (CURRAN et al., 1990).

O uso de medidores de clorofila portáteis tem sido proposto como um método não-destrutivo para se estimar o seu conteúdo, pela medida com leitores óticos que são baseados na absorvância/transmitância e reflectância de certos comprimentos de onda da luz em folhas intactas.

Sabe-se que períodos secos durante a safra afetam o desenvolvimento do dossel pela menor emissão de novos brotos e folhas e pela acelerada senescência da parte aérea (INMAN-BAMBER, 2004; SMIT; SINGELS, 2006). A senescência é um fator de fundamental importância na produção final da cana-de-açúcar, pois reduz a área fotossinteticamente ativa da planta (SANTOS; CARLESSO, 1998).

O crescimento das plantas depende da fotossíntese, que é a conversão da energia luminosa em energia química (SMIT; SINGELS, 2006) e, quanto maior for a interceptação da luz pelo dossel da cultura, maior será o acúmulo de biomassa e de fotoassimilados, que serão posteriormente convertidos em sacarose, armazenados nos colmos e utilizados na respiração e/ou no crescimento das plantas da cana-de-açúcar (HEERDEN et al., 2010; SINGELS et al., 2005).

Diante do exposto, no presente trabalho objetivou-se encontrar as relações entre lâmina de água (chuva e irrigação) e indicadores morfológico (índice de área foliar) e fisiológicos (temperatura foliar, potencial hídrico foliar e índice de clorofila nas folhas) da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação.

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

As condições em que o experimento foi montado, com descrição de área experimental, equipamento, manejo da irrigação, cálculo das lâminas, solo, tratamentos e lâminas aplicadas são apresentadas no Artigo 1.

O experimento foi montado em delineamento em faixas, com seis tratamentos e número de repetições variável de acordo com o parâmetro analisado. Para o IAF e o potencial hídrico foliar fizeram-se quatro repetições. Para temperatura foliar, oito repetições e, para clorofila, 10 repetições.

Foram medidos o índice de área foliar, o potencial hídrico foliar, a temperatura foliar e o Índice de clorofila nas folhas como segue.

O índice de área foliar-IAF ( $m^2 m^{-2}$ ) foi determinado utilizando o equipamento LAI-2000 (LI-COR). O aparelho foi configurado para realizar seis leituras, sendo uma acima do dossel e cinco abaixo, em cada uma das quatro fileiras de plantas (repetições) de cada tratamento.

Para determinação do potencial hídrico foliar foi utilizada uma Câmara de Pressão de *Scholander*, com medições realizadas em folhas coletadas entre 05:00 e 06:00 horas (potencial hídrico de antemanhã). Selecionou-se quatro folhas (repetições) totalmente desenvolvidas, verdes e eretas, que tiveram suas pontas cortadas em segmentos de aproximadamente 20 cm, inseridas na câmara do equipamento e submetidas a pressão crescente, com nitrogênio gasoso, até o momento em que a folha liberasse a primeira gotícula de seiva. Neste momento fechou-se a válvula que libera o gás para o interior do equipamento e fez-se a leitura no manômetro, que indica a pressão interna da câmara, equivalente à tensão de água na folha da planta.

A temperatura do dossel de plantas foi medida utilizando um termômetro a infravermelho dotado de apontador a laser, a uma distância de aproximadamente dois metros acima das folhas, com leituras feitas a partir das 12:00 horas, com duração de aproximadamente 30 minutos. As medições foram realizadas em dias de céu claro, com ausência total de nuvens. Fez-se oito leituras em cada tratamento (repetições), tomadas

aleatoriamente em grupos de plantas dentro da área onde foram aplicados os tratamentos. A temperatura do ar foi medida, em estação meteorológica próxima ao local, para determinação da diferença entre as temperaturas do dossel e do ambiente.

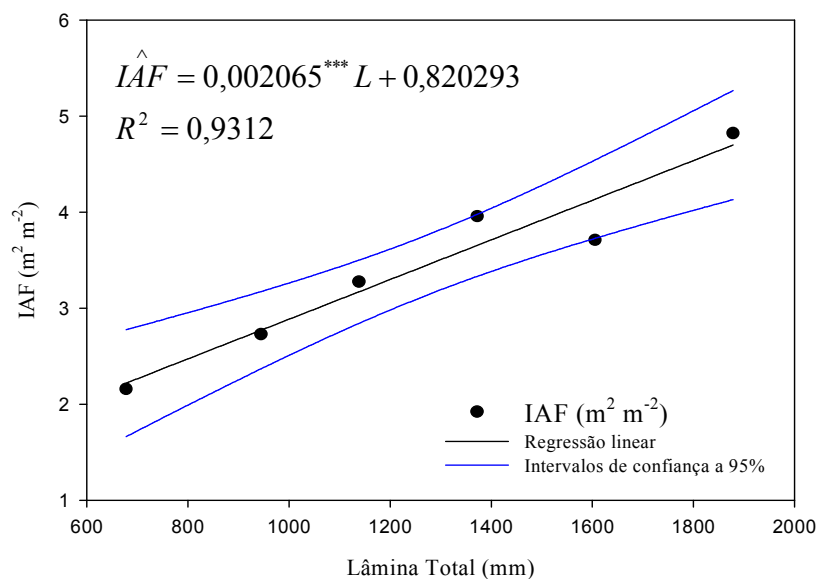
Para determinação do Índice de Clorofila, foi utilizado um medidor eletrônico portátil – Clorofilômetro, modelo CFL 1030, fabricado pela Falker Automação Agrícola. O aparelho faz a leitura de forma ótica, com leituras diretas e não-destrutivas, capacidade de leituras diferenciadas de clorofilas “a” e “b” e compensação de temperatura no intervalo de 0 a 50 °C. Os resultados são expressos em ICF (Índice de Clorofila), que podem variar de 0 a 100, com resolução de 0,1 ICF. Em cada tratamento fez-se 10 medições (repetições) aleatórias em folhas totalmente desenvolvidas, saudáveis e eretas. De acordo com Santos et al. (2009) esse número de repetições é suficiente para representar adequadamente o ICF em cana-de-açúcar.

Os valores obtidos nas repetições foram submetidos a análises de variância e, posteriormente, elaboradas regressões com uso do aplicativo SAEG 9.1. Os coeficientes encontrados para as equações de regressão foram submetidos ao teste t, com posterior correção, considerando-se o Quadrado Médio do Resíduo e os Graus de Liberdade da ANOVA e o Quadrado Médio Independente da Regressão. Foram adicionados os Intervalos de Confiança da Regressão, ao nível de 95% de probabilidade.

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição do balanço hídrico com detalhes sobre umidade, limites de armazenamento de água no solo e precipitações pluviométricas são apresentadas no Artigo 1.

Na Figura 2.1 são apresentados os Índices de Área Foliar ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) para as médias dos tratamentos na última avaliação. São observados maiores índices de área foliar para as maiores lâminas, com a maior média para o T6, com  $4,8 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ . O menor valor médio foi observado para o T1, com  $2,28 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ .



\*\*\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”

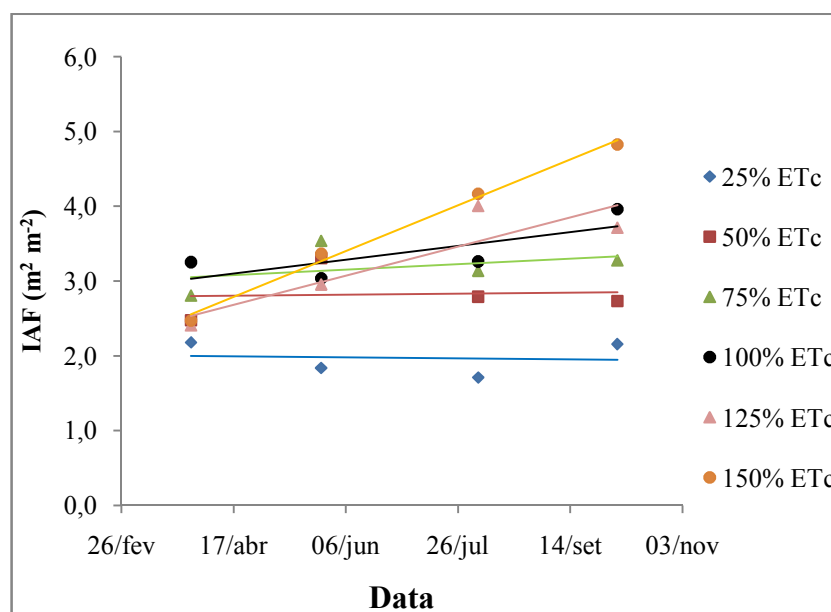
**Figura 2.1** – Índice de área foliar – IAF ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) na última avaliação em função das lâminas de água totais no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Em estudo de lâminas de irrigação na cana-de-açúcar, Farias et al. (2007) encontraram valores médios inferiores aos apresentados neste trabalho, que foram de  $3,77 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$  para o máximo valor encontrado, com 100% de suprimento da ETc e

1,77 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> para o mínimo, com 25% da ETc. Scarpari; Beauclair (2008) encontraram valores máximos de 6,41 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> para cana irrigada satisfatoriamente.

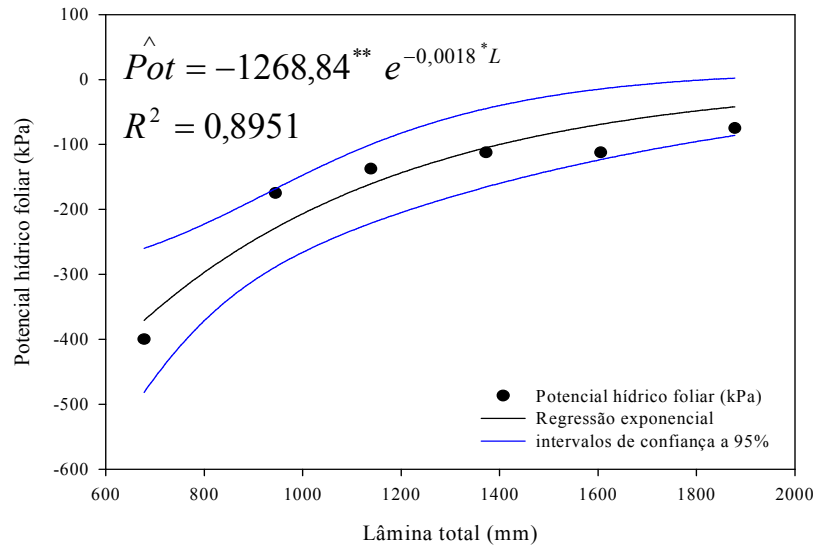
Para os tratamentos com menores lâminas houve antecipação da senescência foliar com secamento prematuro das folhas, o que causou redução da superfície do limbo foliar e verticalização das folhas. Como o aparelho utilizado na medição calcula o IAF em função da luminosidade interceptada pelas folhas, comparada à luminosidade acima do dossel, as folhas, em posição vertical, não contribuem para a interceptação luminosa, reduzindo os valores de IAF.

Observa-se na Figura 2.2 a evolução da área foliar para os tratamentos do dia 29 de março de 2011 (primeira avaliação) até o final do ciclo, que ocorreu no dia cinco de outubro, ocasião da última avaliação e colheita. Para os tratamentos que receberam as maiores lâminas observa-se maior aumento do índice de área foliar, quando comparados aos que receberam menos água.



**Figura 2.2** – Evolução dos índices de área foliar para os tratamentos durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Na Figura 2.3 é apresentada a relação entre a lâmina de água aplicada no ciclo e o potencial hídrico foliar. Observa-se tendência de aumento do potencial hídrico foliar à medida que se forneceu mais água para a cultura. Para o menor valor de lâmina (677,9 mm), é observado o menor valor de potencial hídrico foliar, evidenciando que a cultura sofreu maior estresse hídrico neste tratamento.

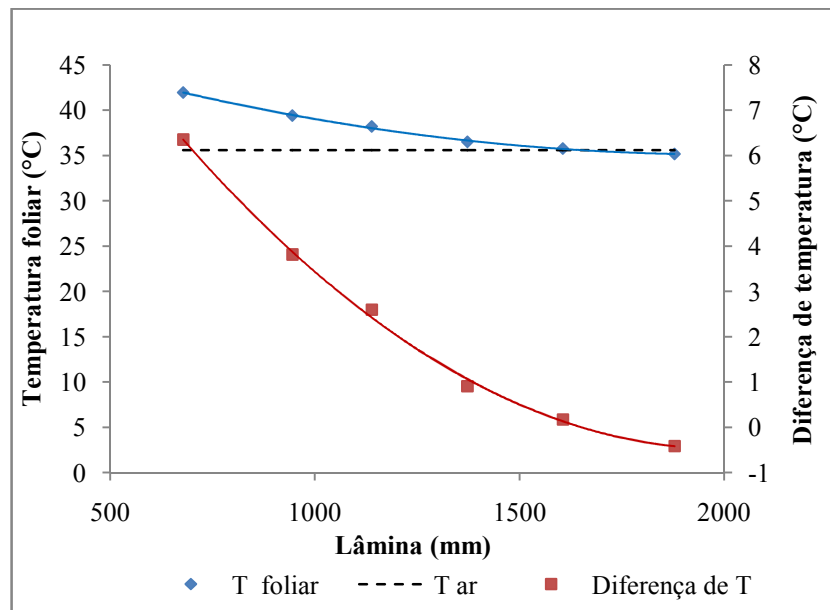


\*\*Significativo ao nível de 5%; \*Significativo ao nível de 10% de probabilidade pelo teste “t”

**Figura 2.3** – Potencial hídrico foliar (kPa) em função das lâminas de água totais no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Existe alta correlação entre o potencial hídrico foliar e a fotossíntese, pois em plantas estressadas, a redução do potencial causa a diminuição de atividades enzimáticas que envolvem o processo de fixação de CO<sub>2</sub> (KOONJAH et al., 2006). Com isso, espera-se que plantas que apresentem baixos valores de potencial hídrico foliar, apresentem menores valores de produtividade.

Na Figura 2.4 observa-se os valores de temperatura foliar e as diferenças entre as temperaturas ambiente e foliar. Os tratamentos que receberam maiores lâminas (100 a 150% da ETc) apresentaram temperaturas próximas à temperatura ambiente. Nos tratamentos que receberam as menores lâminas, as plantas apresentaram temperaturas superiores à do ambiente, chegando a 6,35 °C de diferença.



**Figura 2.4** – Temperatura do ar, temperatura foliar (°C) e diferença de temperatura entre o dossel e o ar em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar.

Esses resultados corroboram com os de Trentin et al. (2011), em estudo realizado em casa de vegetação com cana-de-açúcar, *cultivar* RB 86-7515, em que as plantas mantidas sob adequado fornecimento hídrico apresentaram temperaturas inferiores, em torno de 6,6 °C, quando comparadas àquelas sob condições de estresse hídrico severo e elevada radiação solar.

Para que se possa utilizar a temperatura foliar no manejo da irrigação, como indicador das condições hídricas da cultura, conforme recomendou Lobo et al. (2004), é necessário que se estabeleça índices de estresse hídrico, que determinem o momento e a lâmina de irrigação. No entanto, existem vários inconvenientes do uso deste método, uma vez que, condições climáticas diferentes daquelas ocorridas durante o experimento, podem gerar respostas diferentes da cultura à disponibilidade hídrica. Como no presente experimento as leituras foram realizadas em dias de pleno sol, somente em condições semelhantes, os índices estabelecidos seriam confiáveis. Desse modo, não seria possível estabelecer estimativas da lâmina de irrigação em dias nublados, a menos que fossem empregados métodos de correção.

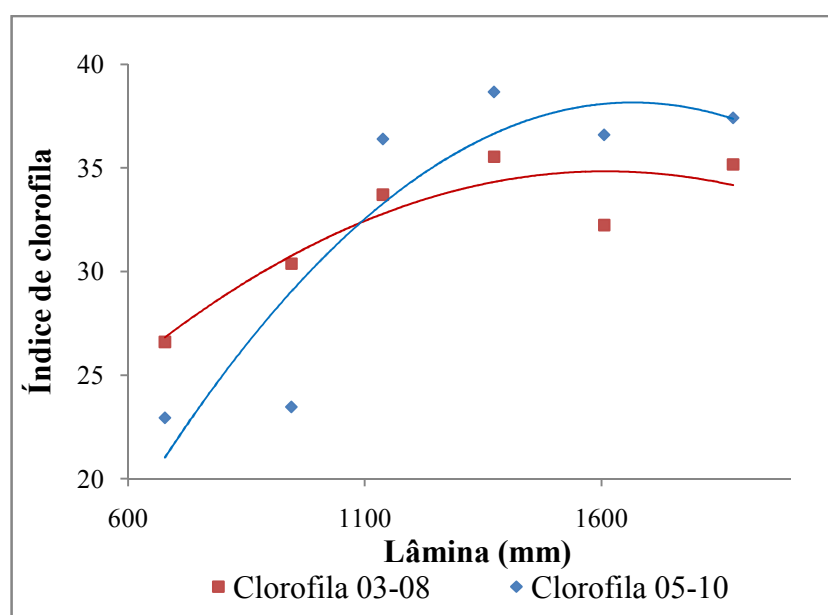
No Quadro 2.1 são apresentadas as equações de regressão, tendo-se como variáveis independentes as lâminas de irrigação e variáveis dependentes a temperatura foliar e a diferença de temperatura entre as folhas e o ar ambiente.

**Quadro 2.1** – Equações de Regressão da temperatura foliar e das diferenças entre as temperaturas ambiente e foliar em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar

Data	Equação	R <sup>2</sup>
Temperatura foliar	$\hat{T}_{foliar} = 0,0000039^{***} L^2 - 0,0156^{***} L + 50,7416$	0,9982
Diferença de temperatura	$\hat{\Delta}_t = 0,0000039^{***} L^2 - 0,0156^{***} L + 15,1416$	0,9982

\*\*\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t.

Os valores de Índice de Clorofila-ICF, para os dias três de agosto e cinco de outubro de 2011, são apresentados na Figura 2.5. Para ambas as datas observa-se aumento do ICF à medida que se aumentam as lâminas aplicadas, com tendência de decréscimo do ICF nos maiores valores de lâminas. Para a avaliação feita em outubro a tendência foi ainda mais acentuada.



**Figura 2.5** – Índice de clorofila em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar para os meses de agosto e outubro.

Songsri et al. (2008), Gonçalves et al. (2010), Jangpromma et al. (2010) e Dias (2011) também observaram redução do índice de clorofila em plantas submetidas ao estresse hídrico, quando comparadas a plantas irrigadas satisfatoriamente. O déficit hídrico afeta a concentração de pigmentos, reduzindo a capacidade fotossintética, o que pode promover redução da produtividade e do rendimento industrial da cana-de-açúcar.

Da mesma forma, nas parcelas que receberam maiores lâminas o alagamento promoveu redução dos ICF's, devido à ocorrência de anaerobiose nas raízes.

No Quadro 2.2 são apresentadas as equações de regressão, tendo-se como variáveis independentes as lâminas de irrigação e variáveis dependentes o Índice de Clorofila, para as avaliações realizadas em agosto (ICF<sub>08</sub>) e outubro (ICF<sub>10</sub>) de 2011.

**Quadro 2.2** – Equações de Regressão dos Índices de Clorofila em função da lâmina de água total no ciclo da cultura da cana-de-açúcar para os meses de agosto e outubro

Data	Equação	R <sup>2</sup>
03/08/11	$\hat{ICF}_{08} = -0,0000092^* L^2 + 0,0298^{**} L + 10,8712$	0,8186
05/10/11	$\hat{ICF}_{10} = -0,000018^{***} L^2 + 0,0585^{***} L - 10,5532$	0,8101

\*\*\*Significativo ao nível de 1%; \*\*Significativo ao nível de 5%; \*Significativo ao nível de 10% de probabilidade pelo teste “t”

É possível relacionar o estado hídrico da cana-de-açúcar com os índices de clorofila em pesquisas que visem indicar variedades tolerantes à seca, sendo um método rápido, fácil e não-destrutivo. No entanto, diferentes *cultivares* da mesma espécie vegetal apresentam diferentes índices de clorofila (SILVA et al., 2007), tornando necessário o conhecimento dos índices específicos de cada cultivar estudada.

## 2.4. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, é possível concluir que: houve tendência de aumento do índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar à medida que se aumentou a lâmina de irrigação no ciclo da cultura; o aumento do IAF foi mais acentuado nos tratamentos que receberam mais água; o potencial hídrico foliar foi menor para menores lâminas de irrigação, com destaque para o tratamento que recebeu as menores lâminas (25% da ETc); a temperatura foliar foi próxima à temperatura do ar nos tratamentos que receberam as maiores lâminas (100 a 150% da ETc), com tendência de aumento da diferença entre a temperatura das folhas à medida que se reduziu o suprimento hídrico, chegando a 6,35 °C para o tratamento mais seco; houve tendência de aumento do índice de clorofila (ICF) à medida que se aumentou as lâminas, com leve queda nos tratamentos que receberam lâminas maiores que 100% da ETc, com tendência mais acentuada no final do ciclo; a deficiência de água no solo afetou o desenvolvimento da cultura, promovendo diminuição da área foliar e do índice de clorofila, com aumento da temperatura foliar e do estresse hídrico, com redução da produtividade. O excesso de água promoveu queda dos teores de clorofila nas folhas devido à anaerobiose na zona radicular.

## 2.5. BIBLIOGRAFIA

CIGANDA, V.; GITELSON, A.; SCHEPERS, J. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content. **Journal of plant physiology**. n. 166. p. 157-167. 2009.

CLAWSON, K. L.; BLAD, B.L. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. **Agronomy Journal**, v.74, p.311-316, 1982.

CURRAN, P.J.; DUNGAN, J.L.; GHOLZ, H.L. Exploring the relationship between reflectance red-edge and chlorophyll content in slash pine, **Tree Physiology**, v.7, p.33-48, 1990.

DAWSON, T.P.; NORTH, P.R.J.; PLUMMER, S.E.; CURRAN, P.J. Forest ecosystem chlorophyll content: implications for remotely sensed estimates of net primary productivity. **International Journal of Remote Sensing**. vol. 24. I. 3. p. 611-617. 2003.

DIAS, C.M. de O. **Indicadores fisiológicos, fitotécnicos e agroindustriais de variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob duas condições hídricas**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 67 f. 2011.

FARIAS, C.H. de A.; DANTAS NETO, J.; FERNANDES, P.D.; GHEIY, H.R. Índice de área foliar em cana-de-açúcar sob diferentes níveis de irrigação e zinco na paraíba. **Revista Caatinga**, v.20, n.4, p. 45-55, 2007.

FUCHS, M.; TANNER, C.B. Infrared thermometry of vegetation. **Agronomy Journal**, v.58, p.597-601, 1966.

GARDNER, B.R.; BLAD, B.L.; WATTS, D.G. Plant and air temperatures in differentially-irrigated corn. **Agricultural Meteorology**, v.25, p.207-217, 1981.

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

HEERDEN, P.D.R.Van; DONALDSON, R.A.; WATT, D.A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v.61, n.11, p.2877-2887, 2010.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environment variability. **Agricultural Meteorology**, v.24, p.45-55, 1981.

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

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

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

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

JANGPROMMA, N.; SONGSRI, P.; THAMMASIRIRAK,S.; JAISIL, P. Rapid assessment of chlorophyll content in sugarcane using a SPAD Chlorophyll Meter across different water stress conditions. **Asian Journal of Plant Sciences**, V.9, n.6, p.368-374, 2010.

KOONJAH, S.S.; WALKER, S.; SINGELS, A.; VAN ANTWERPEN, R.; NAYAMUTH, A.R. A quantitative study of water stress effect on sugarcane photosynthesis. **Proceedings...** South African Sugar Technology Association, v.80, p.148-158, 2006.

LANDELL, M.G. de A.; MACHADO, R.S.; SILVA D.N. da; SCARPARI, M.S.; XAVIER, M.A.; CRESTE, S.; ANJOS, I.A. dos; PRADO, H. do; PINTO, L.R.; BIDÓIA, A.P. **A interação entre a cana-de-açúcar e ambientes de produção**

**estressantes.** In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 34-42, 2010.

LOBO, F. de A.; OLIVA, M.A.; RESENDE, M.; LOPES, N.F.; MAESTRI, M. Infrared thermometry to schedule irrigation of common bean. **Pesq. agrop. Bras**, v.39, n.2, p.113-121. 2004.

MANTOVANI, E, C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação - Princípios e Métodos.** 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 355 p.

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

SANTOS, T.J. dos; MOLIN, J.P.; PORTZ, G. **Desenvolvimento de metodologia de uso de um clorofilômetro comercial nacional para o manejo da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar.** ESALQ/USP, Piracicaba, 2009. 15 p.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. de. Variação espaço-temporal do índice de área foliar e do brix em cana-de-açúcar. **Bragantia**, v.67, n.1, p.35-41, 2008.

SILVA, M. de A.; PINCELLI, R.P. **Alterações morfofisiológicas na cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica.** In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 43-48, 2010.

SILVA, M. de A.; SANTOS, C.M. dos; ARANTES, M.T.; PINCELLI, R.P. **Fenologia da cana-de-açúcar.** In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 8-21, 2010.

SILVA, M.A.; JIFON, J.L.; SILVA, J.A.G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, n.3, p.193-201, 2007.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v.92, p. 291-303, 2005.

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

SOARES, A.R.; MANTOVANI, E.C.; RENA, A.B.; SOARES, A.A. Irrigação e Fisiologia da Floração em Cafeeiros Adultos na Região da Zona da Mata de Minas Gerais. **Acta Scientiarum**, v. 27, n. 1, p. 117-125, 2005.

SONGSRI, P.; JOGLOY, S.; HOLBROOK, KESMALA, T.; VORASOOT, N.; AKKASAENG, C.; PATANOTHAI, A. Association of root, specific leaf area and SPAD chlorophyll meter reading to water use efficiency of peanut under different available soil water. **Agricultural Water Management**, v. 96, p.790-798, 2008.

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

TESTI, L.; GOLDHAMER; D.A.; INIESTA; F.; SALINAS, M. . Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. **Irrigation Science**, v. 26, p. 395-405, 2008.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A.J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1085-1095, 2011.

WALTERS, D.T. **Diagnosis of nitrogen deficiency in maize and the influence of hybrid and plant density**. In: North central extension-industry soil fertility conference. vol. 19. Des Moines, IA. 2003.

### ARTIGO 3

## REDUÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA

### RESUMO

Desenvolveu-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar a redução da evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada, utilizando quatro fatores de disponibilidade hídrica (fator “f”) no manejo da irrigação, bem como seus efeitos na produtividade, maturação, acúmulo de açúcares e área foliar. O experimento foi instalado em outubro de 2010 em Jaíba/MG, em uma área irrigada por pivô central, com cana-de-açúcar no quarto ciclo. Para se avaliar a redução da evapotranspiração da cultura, em função do fator “f”, dividiu-se a área irrigada em quatro quadrantes, com a decisão de aplicação das lâminas de irrigação diferenciada para cada tratamento, o que implicou em diferentes turnos de rega. Os tratamentos corresponderam aos fatores de disponibilidade hídrica do solo de 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9. Determinou-se o Brix, o índice de maturação, o índice de área foliar, a produtividade de colmos e os açúcares totais recuperáveis (ATR). Diante dos resultados obtidos, foi possível concluir que: ao se irrigar a cana com “f” 0,7, obteve-se 17% de redução da evapotranspiração da cultura, se comparado ao “f” 0,5; não se recomenda irrigar a cultura com “f” 0,3, visto que se aumenta o consumo de água em 20% se comparado ao “f” 0,5 e não se obtém aumento da produtividade de colmos e de açúcares; os maiores valores de EUA foram encontrados, com a lâmina de 1.540 mm, para as produtividades de colmos ( $8,29 \text{ kg m}^{-3}$ ) e de açúcares ( $1,22 \text{ kg m}^{-3}$ ); recomenda-se “f” de 0,5 no manejo da irrigação, visando maximizar a eficiência e uso de água para produtividades de colmos e açúcares; O maior rendimento de açúcares por área se deu no tratamento T2, com  $18,73 \text{ t de açúcar por hectare}$ , seguido de T1, com  $17,06 \text{ t ha}^{-1}$ , T3 com  $15,18 \text{ t ha}^{-1}$  e T4, com  $12,97 \text{ t ha}^{-1}$ . São necessários estudos que avaliem o comportamento da cana-de-açúcar

em solos de textura argilosa e arenosa, com o manejo da irrigação feito em diferentes fatores “F”.

## PAPER 3

### EVAPOTRANSPIRATION REDUCTION OF SUGARCANE IRRIGATED UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF WATER AVAILABILITIES

#### ABSTRACT

This study was carried out aiming to evaluate the reduction of evapotranspiration of sugarcane irrigated using four factors of water availability (“f” factor) in the irrigation, as well its effects on yield, maturation, sugar accumulation and leaf area. The experiment was installed in October 2010 in Jaíba/MG, Brazil, in an area irrigated by center pivot with sugarcane in the fourth cycle. To evaluate the evapotranspiration reduction, depending on the “f” factor, the irrigated area was divided into four quadrants with different irrigation levels for each treatment, resulting in different irrigation frequencies. The treatments were the factors of soil water availability of 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9, and the analyzed factors were Brix, the maturation index, the leaf area index, sugarcane yield and total recoverable sugars (ATR). Based on the results, it was concluded that: when irrigating sugarcane with “f” 0.7 a 17% reduction in evapotranspiration was obtained compared to “f” 0.5; irrigation at “f” 0.3 is not recommended since water consumption is increased by 20% compared to “f” 0.5 there was no increase in sugar content and stalk yield. The highest EUA values of for stalks ( $8.29 \text{ kg m}^{-3}$ ) and sugar yields ( $1.22 \text{ kg m}^{-3}$ ) were found at the depth of 1,540 mm. The highest sugar yields per area unit occurred in T2, with 18.73 tons of sugar per hectare, followed by T1, with  $17.06 \text{ t ha}^{-1}$ , T3 with  $15.18 \text{ t ha}^{-1}$  and T4, with  $12.97 \text{ t ha}^{-1}$ . Comparative studies are needed to evaluate the behavior of sugarcane in clayey and sandy soils, with irrigation performed based on different "f" factors.

### 3.1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das mais viáveis alternativas para a produção de biocombustíveis e energias renováveis no mundo, produz 78% do açúcar mundial, além de contribuir com a co-geração de energia elétrica (ENDRES et al., 2010; SHRIVASTAVA et al., 2011).

Segundo Doorenbos; Kassam (1979), dependendo do clima, a quantidade de água que a cultura da cana-de-açúcar necessita varia de 1.500 e 2.500 mm anuais. Nas áreas canavieiras do Brasil, o total de precipitação anual varia de 1.100 a 1.500 mm por ano.

De acordo com Inman-Bamber; Smith (2005), uma precipitação pluvial anual a partir de 1.000 mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções na cana-de-açúcar. Isso implica que o manejo de água seja realizado com eficiência, com suprimentos adequados durante o crescimento vegetativo (principalmente nas fases de germinação, perfilhamento e alongamento dos colmos) e alguma restrição no período de maturação, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento de sacarose.

Devido à tendência de decréscimo de disponibilidade de água para a agricultura, ao aumento dos custos de energia elétrica e à implantação de tarifação do uso da água por parte dos comitês de bacias hidrográficas (LÓPEZ-MATA et al., 2010; TURCO et al., 2009), tem-se buscado otimizar o manejo da irrigação das culturas, com vistas a aumentar a eficiência de uso da água.

Segundo Santana et al. (2008), a melhoria da performance dos sistemas de irrigação e o aprimoramento do manejo da irrigação é de grande importância e são necessários para aumentar a produtividade por unidade de água e tornar a agricultura irrigada sustentável, uma vez que, a disponibilidade de água para a irrigação será reduzida no futuro, devido ao aumento da demanda por outros setores prioritários (SANTOS et al., 2010).

Segundo Carr; Knox (2011), novas formas de se manejar a irrigação têm sido desenvolvidas e propostas, mas poucos resultados têm sido aplicados. O manejo de água

adequado e estratégico pode ser feito utilizando-se a eficiência de uso da água para ajustar o planejamento e a tomada de decisão da irrigação, aumentando-se a produtividade da cultura (KARATAS et al., 2009).

Para aplicar a lâmina de irrigação adequada, o agricultor precisa conhecer a demanda hídrica da cultura que permita a obtenção de produtividades satisfatórias (KISI, 2010), sendo necessária a estimativa precisa da evapotranspiração para o manejo eficiente da irrigação (TRAJKOVIC; KOLAKOVIC, 2009).

De acordo com Arêdes et al. (2010), a elevação do nível de produtividade ocasionada pela irrigação promove significativo aumento da atratividade de investimento na agricultura, elevando consideravelmente os indicadores econômicos e redução do tempo de recuperação do capital investido.

Para se manejar adequadamente a irrigação das culturas, é necessário que se estabeleça limites mínimos de armazenamento de água no solo, de modo que este forneça água às plantas satisfatoriamente. Para isso utiliza-se o fator “f” (MANTOVANI et al., 2009), que é um fator de segurança que tem sua proporção definida segundo o valor econômico e a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. Um fator “f” de 0,4 significa que as plantas podem consumir até 40% de toda água disponível no solo (BERNARDO et al., 2008), sem que haja redução significativa da produtividade. De acordo com MANTOVANI et al. (2009) a água disponível no solo está contida no intervalo entre as umidades na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

Os valores de f para a cultura da cana-de-açúcar encontrados na literatura variam de 0,50 a 0,70. Mantovani et al. (2009) recomendam o valor de 0,50 de modo a propiciar um menor esgotamento de água no solo, diminuindo o estresse hídrico da cultura. Allen et al. (1998); Oliveira et al. (2010) citam o valor intermediário de 0,65 e Bernardo et al. (2008) acreditam que pode-se deixar que 70% da água armazenada no solo pode esgotar-se até o momento da irrigação, indicando o valor de 0,70.

Diante do exposto, desenvolveu-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar a redução da evapotranspiração da cana-de-açúcar irrigada, utilizando quatro fatores de disponibilidade hídrica (fator “f”) no manejo da irrigação, bem como seus efeitos na produtividade, maturação, acúmulo de açúcares e área foliar.

### 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado nas mesmas condições apresentadas no Artigo 1, com descrição da área experimental, do solo, do equipamento e do manejo da irrigação. A cultura utilizada foi a cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) cultivar RB 86-7515, de ciclo tardio, no quarto ciclo (terceira soqueira). O solo local é classificado como Neossolo Quartzarênico, com baixa fertilidade natural e pequena capacidade de retenção de água. Os tratos culturais (capinas, adubação, controle fitossanitário) no decorrer do ciclo foram realizados conforme as recomendações da Fazenda, com objetivo de maximizar a produtividade.

As características da cultura cadastradas no aplicativo, utilizadas para o manejo da irrigação, são apresentadas no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1** – Características da cultura

Cultura						
Ciclo	Fase	Duração	<sup>1</sup> Kc	<sup>2</sup> Z	Área Sombreada	<sup>3</sup> f
		(dias)		(cm)	(%)	
Soca 3	Brotação	20	0,40	0,3	15	<sup>4</sup> V
Soca 3	Perfilhamento	80	variável	0,5	50	<sup>4</sup> V
Soca 3	Desenvolvimento	240	1,25	0,5	100	<sup>4</sup> V
Soca 3	Maturação	27	<sup>5</sup> 0,80	0,5	100	<sup>4</sup> V

<sup>1</sup>Coefficiente da cultura; <sup>2</sup>Profundidade efetiva do sistema radicular; <sup>3</sup>Fator de disponibilidade hídrica; <sup>4</sup>Variável, conforme o tratamento descrito no Quadro 2; <sup>5</sup>valor de kc final do último dia da fase.

Para se avaliar a redução da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em função do fator de disponibilidade de água no solo (fator “f”), foi conduzido um experimento em uma área cultivada com a cultura, sob irrigação por pivô central, que foi dividida em quatro quadrantes, com a decisão de aplicação das lâminas de irrigação

diferenciada para cada quadrante, o que implicou na aplicação das lâminas de irrigação com diferentes turnos de rega. Os tratamentos corresponderam, respectivamente, aos seguintes fatores de disponibilidade hídrica do solo: 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9, ou seja, para o tratamento T1, a irrigação ocorreu quando 30% da água total disponível do solo havia sido consumida pela cultura e assim por diante para todos os tratamentos, conforme apresentado no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2** - Fatores de disponibilidade hídrica utilizados no manejo da irrigação e os respectivos quadrantes onde os tratamentos foram aplicados

Tratamentos	Quadrante	Fator de disponibilidade hídrica (“f”)
T1	Q1	0,3
T2	Q2	0,5 <sup>1</sup>
T3	Q3	0,7
T4	Q4	0,9

<sup>1</sup>Valor de referência.

Ao final do experimento, foram calculados os somatórios da evapotranspiração da cultura, das lâminas de irrigação aplicadas, dos números de irrigações realizadas, das precipitações efetivas e das lâminas totais ocorridas no ano/safra agrícola com duração de 10 meses.

O experimento foi conduzido no delineamento em faixas, com quatro tratamentos (fatores “f”). Os números de repetições foram de quatro, para Índice de Área Foliar (IAF) e Índice de Maturação (IM), e de três, para Produtividade e Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), com as parcelas distribuídas no quadrante específico de cada tratamento. As parcelas possuíam 12 m de comprimento com 5 linhas de cana, tendo como área útil as três linhas centrais com comprimento de 10 m.

Foram determinados o Brix e o índice de maturação (IM), o índice de área foliar (IAF), a produtividade de colmos e os açúcares totais recuperáveis (ATR). Os métodos utilizados estão descritos nos Artigos 1 e 2. Foram calculadas as eficiências de uso de água – EUA ( $\text{kg m}^{-3}$ ) para a produtividade de colmos e de ATR.

A colheita, que estava prevista para o dia 10 de outubro, ocorreu no dia 11 de agosto de 2011, em virtude de um incêndio que queimou toda a área experimental. Com isso, o ciclo da cultura foi de 10 meses.

As colheitas dos colmos foram realizadas manualmente, cortando-se fileiras de 10 metros lineares nas parcelas úteis de cada tratamento. Após cada colheita, as amostras foram pesadas em dinamômetro e determinadas as massas (kg) da produção de

cada parcela de 15 m<sup>2</sup>, sendo o resultado obtido convertido em toneladas de cana por hectare (t ha<sup>-1</sup>), considerando-se o espaçamento entre fileiras de 1,50 m. Em cada parcela foram retirados três colmos, aleatoriamente, e enviados ao laboratório para a realização das análises de rendimento industrial.

Os valores obtidos nas repetições foram submetidos a análises de variância e, posteriormente, elaboradas regressões com uso do aplicativo SAEG 9.1. Os coeficientes encontrados para as equações de regressão foram submetidos ao teste t, com posterior correção, considerando-se o Quadrado Médio do Resíduo e os Graus de Liberdade da ANOVA e o Quadrado Médio Independente da Regressão. Foram adicionados os Intervalos de Confiança da Regressão, ao nível de 95% de probabilidade.

### **3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na Figura 3.1 estão apresentados os balanços hídricos dos tratamentos, que representam o manejo da irrigação, os limites superior (capacidade de campo) e inferior (ponto de murcha permanente) de armazenamento de água no solo, as umidades de segurança para cada fator “f” e a precipitação, as irrigações realizadas para os tratamentos durante a safra 2010/2011.

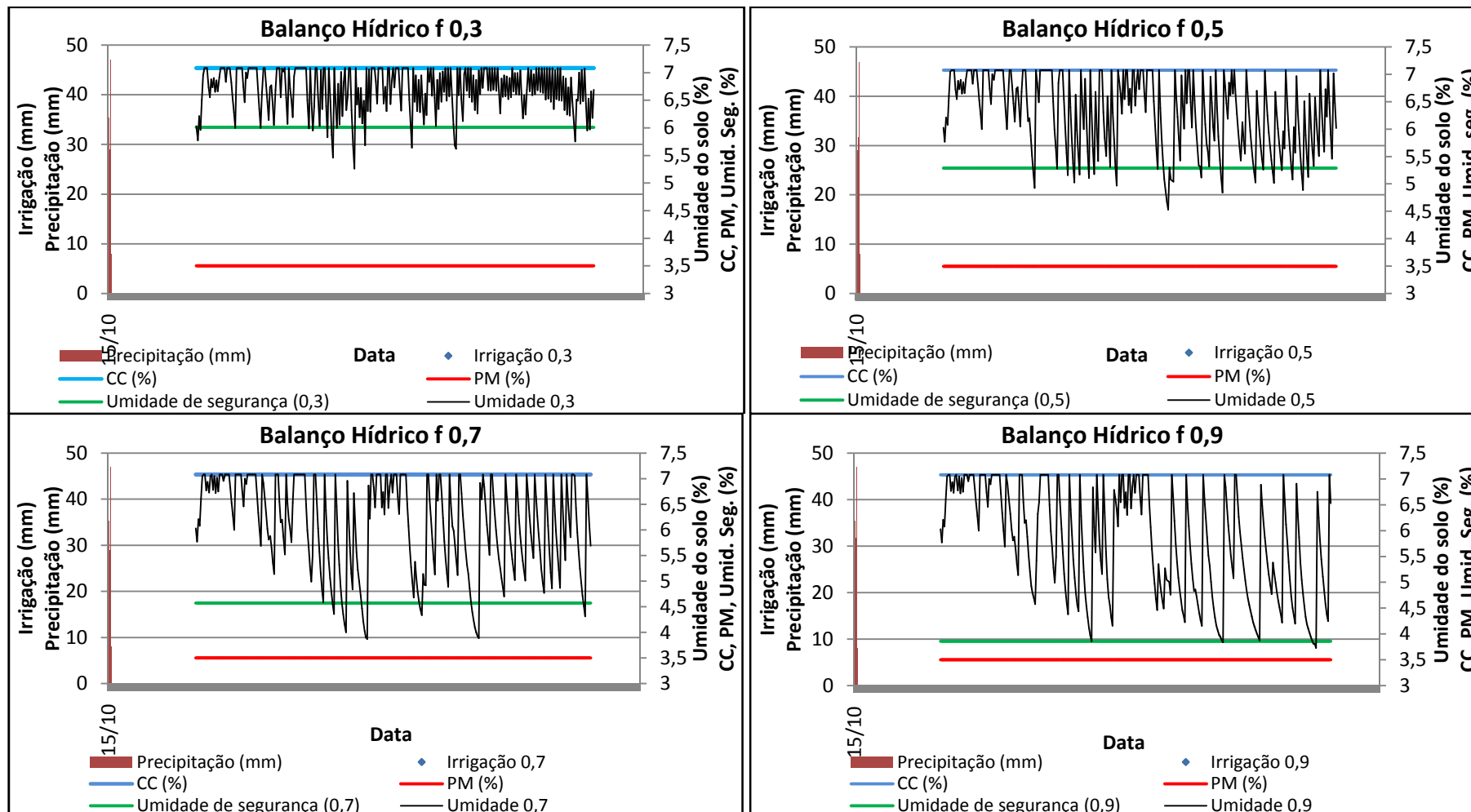


Figura 3.1 – Balanço hídrico e limites de armazenamento de água no solo para o manejo da cultura da cana-de-açúcar, de cada tratamento, durante a safra 2010/2011.

Observa-se que o período chuvoso encerrou-se no dia 19/05/2011, fazendo com que a cultura ficasse totalmente dependente da irrigação, para o suprimento de água, durante 81 dias, até a colheita. A umidade do solo foi mantida no intervalo entre a capacidade de campo e a umidade de segurança, para os diferentes fatores “f”. No Tratamento T1 (“f” = 0,3), observa-se maior frequência de irrigações, com aplicação de lâminas menores, mantendo a umidade do solo sempre próxima à capacidade de campo. À medida que se aumentou os fatores “f”, houve redução da frequência de molhamento com aplicação de lâminas maiores e manutenção da umidade do solo em patamares inferiores. Para o Tratamento T4 (“f” = 0,9), a umidade do solo esteve, em diversos momentos, próxima ao ponto de murcha permanente, visto que se deixou a água armazenada no solo se esgotar quase totalmente.

Em alguns dias, a umidade do solo esteve abaixo da umidade de segurança em função de se fazer um manejo da irrigação acompanhado da previsão de chuvas. Assim, quando se previa determinada chuva, a decisão era de aguardar até o dia seguinte para verificação da ocorrência da precipitação e, caso contrário, se procedia à irrigação. Ocorreram seis, oito, seis e um dias com umidade do solo abaixo do fator “f”, respectivamente, para os Tratamentos T1, T2, T3 e T4. Os valores de umidade do solo medidas, para aferição, foram próximos dos calculados pelo aplicativo.

Os somatórios da demanda evapotranspirativa da cultura, das irrigações realizadas no ciclo, da precipitação total desconsiderando-se o escoamento superficial (*run-off*) e da lâmina total recebida pela cultura, são apresentados no Quadro 3.3.

**Quadro 3.3** – Demanda evapotranspirativa da cultura (ETc), irrigações (mm), número de irrigações no ciclo da cultura, precipitação total no ciclo desconsiderando-se o escoamento superficial (P-ro) e lâmina de água total (LT) recebida pela cultura na safra 2010/2011, para cada Tratamento

<b>Fator <i>f</i></b> <b>(Tratamentos)</b>	<b>ETc<sup>1</sup></b> <b>(mm)</b>	<b>Irrigação</b> <b>(mm)</b>	<b>Número</b> <b>de</b> <b>irrigações</b>	<b>P-ro<sup>2</sup></b> <b>(mm)</b>	<b>LT<sup>3</sup></b> <b>(mm)</b>
0,3	1122,6	1094,9	99	640,4	1735,3
0,5	969,0	898,1	54	642,4	1540,6
0,7	868,4	746,8	36	641,8	1388,6
0,9	759,0	540,0	29	643,1	1183,1

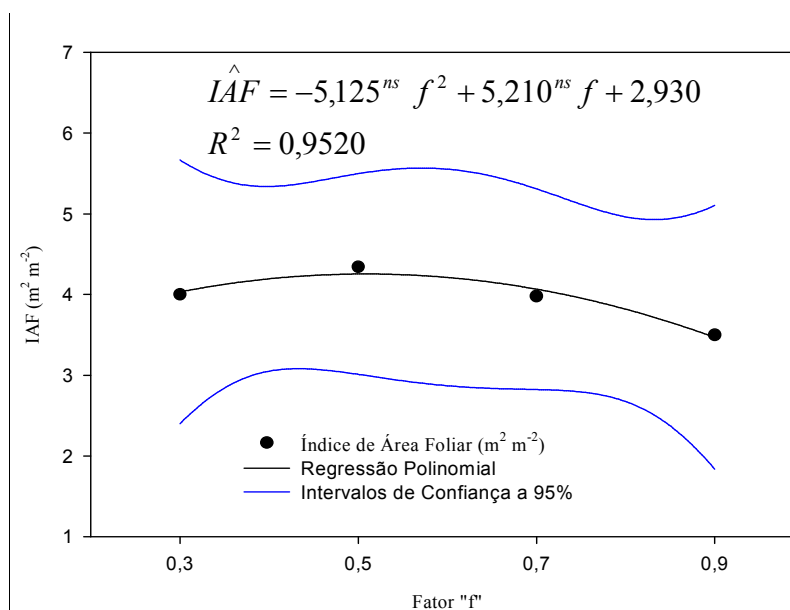
<sup>1</sup>Evapotranspiração da cultura; <sup>2</sup>Precipitação menos escoamento superficial; <sup>3</sup>Obtida pela soma das irrigações e as P-ro.

Observa-se redução da lâmina de irrigação aplicada à medida que se aumentou o valor de “f”. Se no manejo da irrigação faz-se a opção por usar o “f” de 0,7 ao invés de 0,5 (valor de referência), tem-se uma redução de 17% no consumo de água. Se a opção é de usar o valor de 0,9, a redução passa a ser de 40%. No entanto, é necessário avaliar o efeito do fornecimento de menores quantidades de água na produtividade e no rendimento industrial da cana-de-açúcar, uma vez que a cultura passa a sofrer maior estresse hídrico, o que pode provocar redução de seu desenvolvimento, principalmente nos dois primeiros estádios (Fases 1 e 2) (BERNARDO, 2006). Caso a opção seja por irrigar a cultura quando 30% da água armazenada no solo se esgotar, há um aumento de 22% do consumo de água.

Outro ponto a se destacar é que, quanto menor o valor do fator “f”, maior foi o número de irrigações, devido ao menor turno de rega. Trabalhando-se com os fatores “f” de 0,3; 0,5; 0,7 e 0,9, irrigou-se a cultura 99, 54, 36 e 29 vezes, respectivamente. Do ponto de vista operacional, é interessante que se faça o mínimo de irrigações, por demandar menos mão-de-obra e energia elétrica consumida nos motores de movimentação das torres. No entanto, longos intervalos entre as irrigações submetem a cultura a condições de solos mais secos, o que dificulta a absorção de água pelas plantas, levando ao estresse hídrico.

Na Figura 3.2 são apresentados os índices de área foliar para os tratamentos na época de colheita. As plantas submetidas aos maiores intervalos entre irrigações

apresentaram menores valores de IAF, com reduções de 8,5% e 19,5% do IAF, para os tratamentos com “f” 0,7 e 0,9, respectivamente, quando comparados com “f” 0,5.



<sup>ns</sup> Não Significativo pelo teste “t”

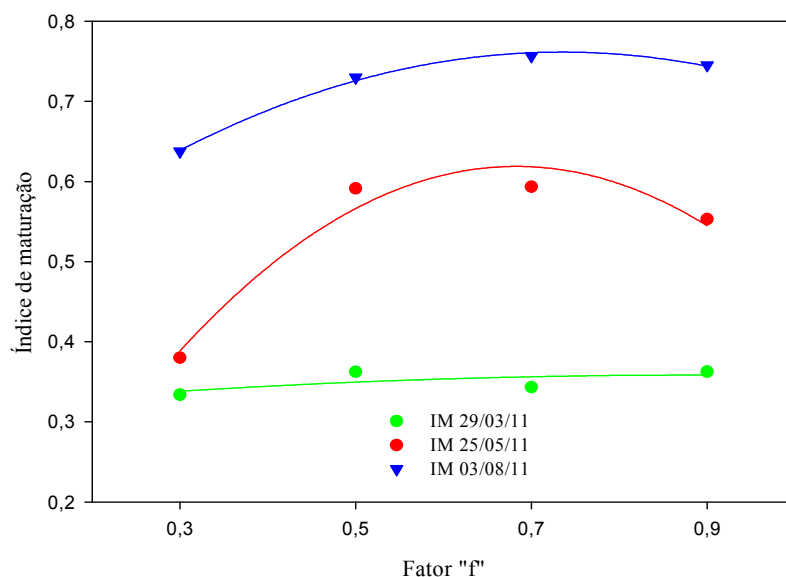
**Figura 3.2** – Índice de área foliar (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) para os tratamentos na época de colheita, equação de regressão quadrática e intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade.

Khan et al. (2011) encontraram valores de área foliar para a cana-de-açúcar, maiores que 6 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, em plantas submetidas ao manejo da irrigação com depleção de 40% (“f” = 0,4) da água armazenada no solo. No mesmo trabalho, verificaram-se decréscimos de até 36% da área foliar, em plantas conduzidas no manejo com depleção de 80% (“f” = 0,8) da água do solo, quando comparadas com o manejo com 40% de depleção. Isso pode ter ocorrido em função do menor desenvolvimento foliar nestes tratamentos, provocado pela deficiência hídrica. Em outros trabalhos (SMIT; SINGELS, 2006; MACHADO et al., 2009) também se observou redução da área foliar da cana-de-açúcar em plantas que foram submetidas a condições de deficiência hídrica.

No tratamento em que a cultura recebeu irrigações mais frequentes também houve um pequeno decréscimo do índice de área foliar, possivelmente pela reduzida aeração do solo, provocada pelo encharcamento. A falta de adequada aeração do sistema radicular em plantas submetidas ao encharcamento do solo provoca queda imediata da respiração das raízes, tanto em plantas tolerantes como nas não tolerantes, que apresentam inibição da formação de primórdios foliares e queda na expansão foliar (LIZASO et al., 2001). No entanto, Souza (2010) não verificou redução da área foliar da

cana-de-açúcar submetida à inundação, em experimento conduzido com vasos em casa-de-vegetação.

Na Figura 3.3 são apresentados os Índices de Maturação (IM) nos dias 29/03, 25/05 e 03/08/2011, para os tratamentos, em que se observam maiores valores de IM na última avaliação, evidenciando o avanço da maturação com o desenvolvimento da cultura. Na última avaliação observa-se tendência de aumento do IM para os tratamentos com irrigação menos frequente. No momento da colheita, nenhum tratamento atingiu valores que indicam a maturidade da cana-de-açúcar (entre 0,85 e 1,00). Isso ocorreu porque a cana foi colhida com 10 meses após o corte, devido à queima ocorrida acidentalmente. Esperava-se que, aos 12 meses, a cana atingisse a maturidade adequada de corte.



**Figura 3.3** – Índices de maturação antes da colheita para cada tratamento.

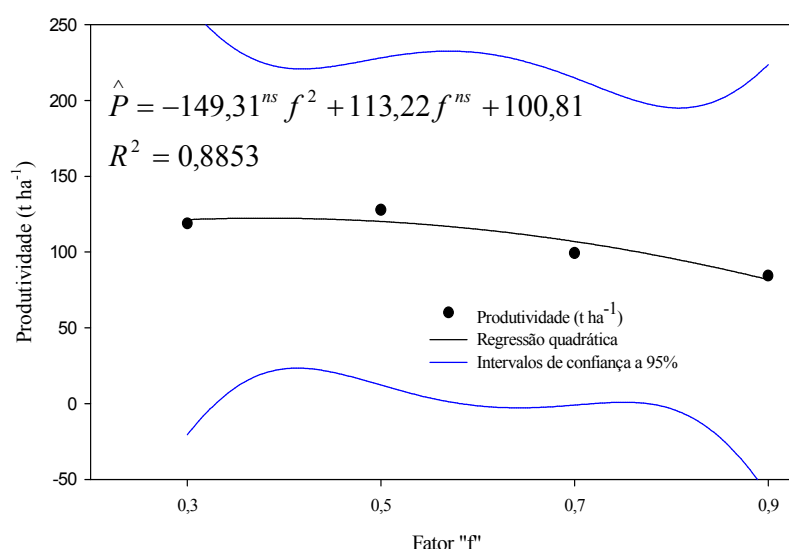
No Quadro 3.4 são apresentadas as equações de regressão dos índices de maturação em função dos fatores “f”, suas significâncias pelo teste “t” e os coeficientes de determinação.

**Quadro 3.4** – Equações de regressão dos índices de maturação em função dos fatores “f”, suas significâncias pelo teste “t” e coeficientes de determinação

Data	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
29/03	$\hat{IM} = -0,058^{ns} f^2 + 0,103^{ns} f + 0,313$	0,400
15/05	$\hat{IM} = -1,57^{***} f^2 + 2,148^{***} f - 0,115$	0,955
03/08	$\hat{IM} = -0,6485^{ns} f^2 + 0,953^{ns} f + 0,412$	0,996

\*\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não Significativo pelo teste “t”.

Na Figura 3.4 são apresentados os resultados de produtividade de colmos, em toneladas por hectare, da cultura da cana-de-açúcar, para os tratamentos, em função dos fatores “f”. Observa-se tendência de redução da produtividade à medida que se aumentam os valores de “f”. Com maiores intervalos entre irrigações, é possível que a cultura tenha maior dificuldade na absorção de água, levando ao estresse hídrico e, conseqüentemente, à redução de produtividade.



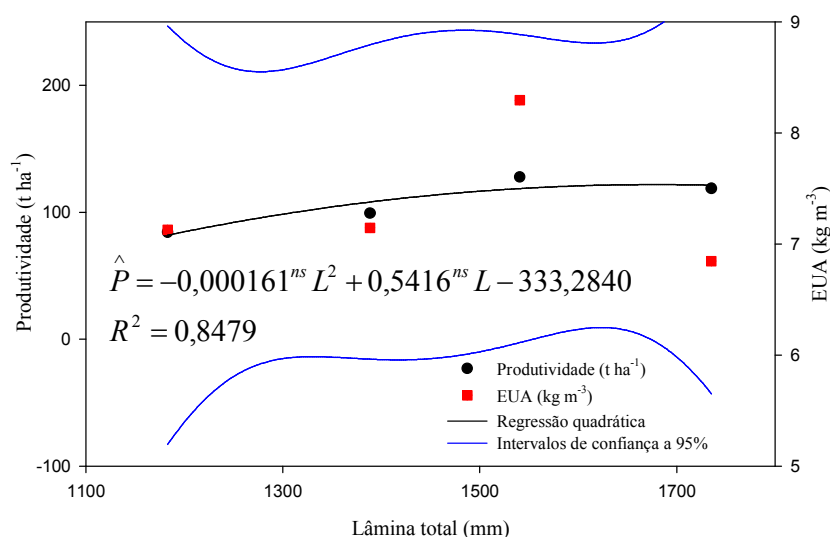
<sup>ns</sup> Não significativo pelo teste “t”.

**Figura 3.4** – Produtividade de colmos de cana-de-açúcar para os tratamentos, equação de regressão quadrática e intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade.

Khan et al. (2011) observaram maiores produtividades da cana-de-açúcar ao se manejar a cultura com 40% de depleção da água armazenada no solo, valores estes

próximos aos resultados deste trabalho. Sagoo et al. (2010) observaram que, tanto o excesso (depleção de 20%) como a falta de irrigação (depleção de 80%) foram prejudiciais à cultura da cana-de-açúcar, se comparados ao manejo com 40% de depleção.

Na Figura 3.5 é apresentada a relação entre a lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura e a produtividade de colmos. Observa-se tendência de aumento da produtividade à medida que se aumenta a lâmina. Verifica-se que para o “f” 0,5, que recebeu 1.540 mm de água, obtém-se a melhor eficiência de uso da água (EUA), com produtividade de colmos igual a 8,29 kg m<sup>-3</sup> de água. Para os tratamentos T1 (“f” 0,3), T3 (“f” 0,7) e T4 (“f” 0,9), as EUA foram de 6,84; 7,15 e 7,13 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Farias et al. (2008) obtiveram EUA máxima de 7,12 kg m<sup>-3</sup> para a lâmina de 1.221 mm e mínima de 3,99 kg m<sup>-3</sup> para 780 mm de água, no cultivo da cana-de-açúcar (SP 79-1011) de ciclo curto, no litoral paraibano.

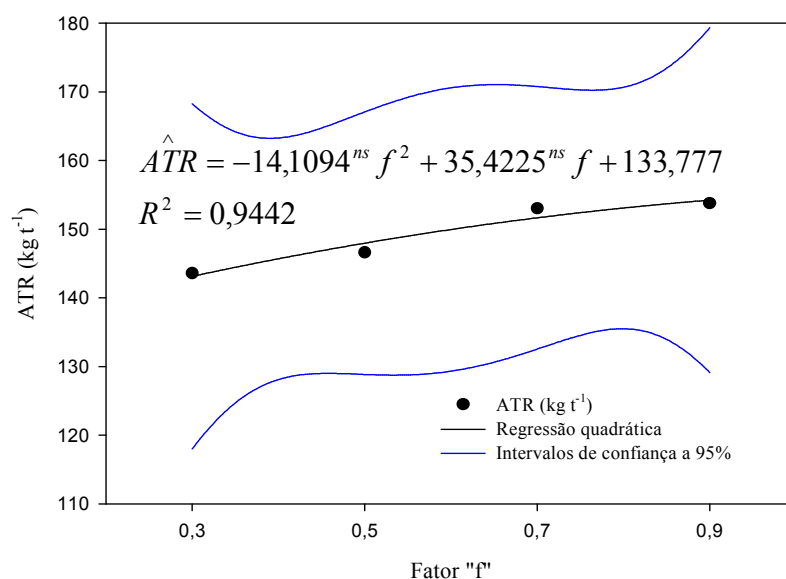


<sup>ns</sup> Não significativo pelo teste “t”.

**Figura 3.5** – Produtividade de colmos de cana-de-açúcar e eficiência de uso de água (EUA) em função da lâmina total aplicada no ciclo, equação de regressão quadrática e intervalos de confiança a 95% de probabilidade.

Os valores médios de ATR (kg t<sup>-1</sup>) apresentaram tendência de aumento linear com o aumento do fator “f” (Figura 3.6). O máximo valor médio de ATR (153,8 kg t<sup>-1</sup>) ocorreu para o fator “f” de 0,9, seguido de 153,0 kg t<sup>-1</sup> para “f” de 0,7. Para os fatores “f” de 0,5 e 0,3, os valores de ATR foram, respectivamente, de 146,6 e 143,6 kg t<sup>-1</sup>. Segundo Lisson et al. (2005), a perda de umidade dos colmos está associada ao ganho

de sacarose, assim, em situações de menor fornecimento hídrico, ocorre maior acúmulo de açúcares. Inman-Bamber; Smith (2005) afirmam que a restrição hídrica é necessária para o acúmulo de sacarose nos colmos na época de corte.

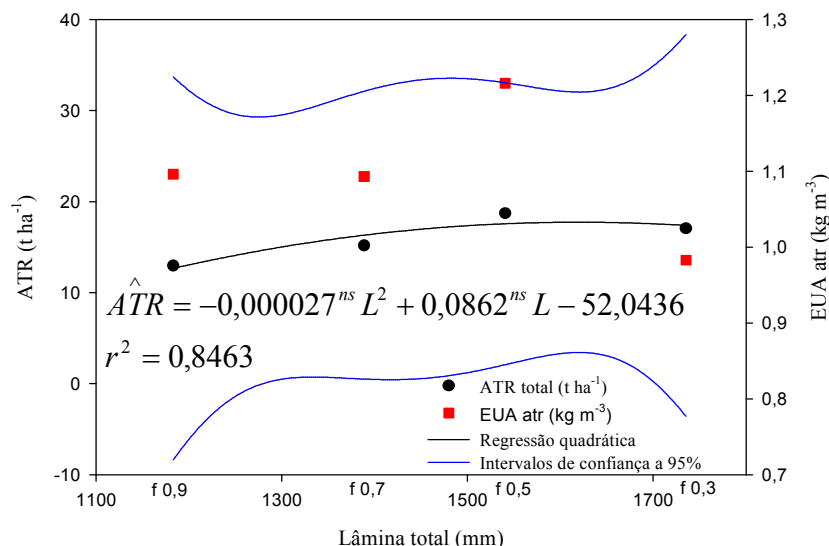


<sup>ns</sup> Não significativo pelo teste “t”.

**Figura 3.6** – Açúcares totais recuperáveis - ATR (kg t<sup>-1</sup>), equação de regressão quadrática e intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade.

O maior rendimento de açúcares por área se deu no tratamento T2, com 18,73 t de açúcar por hectare, seguido de T1, com 17,06 t ha<sup>-1</sup>, T3 com 15,18 t ha<sup>-1</sup> e T4, com 12,97 t ha<sup>-1</sup>. Ressalta-se que, irrigando-se no fator “f” 0,7, tem-se redução de 17% no consumo de água pela cultura, com redução de 19% no rendimento total de açúcares.

Na Figura 3.7 são apresentados o rendimento de açúcares (t ha<sup>-1</sup>), a equação de regressão quadrática, os intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade e a eficiência de uso de água (EUA) em função das lâminas totais no ciclo da cultura. A maior EUA para ATR foi obtida no fator “f” 0,5, com 1,22 kg m<sup>-3</sup>. Para os tratamentos T1 (“f” 0,3), T3 (“f” 0,7) e T4 (“f” 0,9), a EUA foi de 0,98; 1,09 e 1,10 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente.



<sup>ns</sup> Não significativo pelo teste “t”.

**Figura 3.7** – Açúcares totais recuperáveis totais - ATR ( $t\ ha^{-1}$ ), equação de regressão quadrática, intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade e EUA em função das lâminas totais no ciclo da cultura.

Os resultados indicam que, para a cultura da cana-de-açúcar, nas condições em que foi desenvolvido o experimento, pode-se recomenda-se o fator “f” 0,5, o menor valor recomendado na literatura (MANTOVANI et al., 2009; ALLEN et al., 1998; OLIVEIRA et al.; 2010; BERNARDO et al., 2005), em virtude de proporcionar maior produtividade de açúcares por unidade de área e menores riscos associados ao estresse hídrico.

Há que se considerar, ainda, o tipo de solo de cultivo. No presente trabalho, o solo é arenoso, o que implica em pequena retenção de água e sua depleção ocorrendo de forma mais rápida, o que pode requerer irrigações mais frequentes e a adoção de “f” menor. Na região Norte Mineira, devido à alta radiação incidente, baixa umidade relativa e altas temperaturas, a cultura da cana-de-açúcar alcança altos valores de evapotranspiração no período de maior demanda atmosférica de água, chegando a mais de  $8\ mm\ d^{-1}$ , o que promove um rápido esgotamento da água do solo.

Em solos mais argilosos, com maior capacidade de armazenamento de água, pode-se deixar a água depletir mais, visto que, o tempo de depleção é maior, levando mais tempo para se atingir a umidade de segurança.

### 3.4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, para a cultivar RB 86-7515, nas condições em que foi realizado o experimento, é possível concluir que: ao se irrigar a cana, adotando-se o fator “f” 0,7, obtém-se 17% de redução da evapotranspiração da cultura, se comparado ao “f” 0,5, promovendo economia expressiva de água e energia elétrica; não se recomenda irrigar a cultura com “f” 0,3, visto que se aumenta o consumo de água em 20% se comparado ao “f” 0,5 e não se obtém aumento da produtividade de colmos e de açúcares; os maiores valores de EUA foram encontrados, com a lâmina de 1.540 mm, para as produtividades de colmos ( $8,29 \text{ kg m}^{-3}$ ) e de açúcares ( $1,22 \text{ kg m}^{-3}$ ); recomenda-se “f” de 0,5 no manejo da irrigação, visando maximizar a eficiência e uso de água para produtividades de colmos e açúcares; O maior rendimento de açúcares por área se deu no tratamento T2, com 18,73 t de açúcar por hectare, seguido de T1, com 17,06 t ha<sup>-1</sup>, T3 com 15,18 t ha<sup>-1</sup> e T4, com 12,97 t ha<sup>-1</sup>; são necessários estudos que avaliem o comportamento da cana-de-açúcar em solos de textura argilosa e arenosa, com o manejo da irrigação feito em diferentes fatores “f”.

### 3.5. BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ARÊDES, A.F. de; PEREIRA, M.W.G.; SANTOS, M.L. dos. A irrigação do cafezal como alternativa econômica ao produtor. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 193-200, 2010.

BERNARDO, S. **Manejo da irrigação na cana-de-açúcar**. Palestra no XVI CONIRD. Goiânia-GO. 2006. 11p. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana\\_irrigada\\_producao\\_000fizvd3t102wyiv802hvm3j1wle6b8.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Cana_irrigada_producao_000fizvd3t102wyiv802hvm3j1wle6b8.pdf)>. Acesso em: 24 de set. 2010.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV. 2008. 611 p.

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

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 33).

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

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; DANTAS NETO, J.D. GHEYI, H.R. Eficiência de uso de água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.3, p. 494-509, 2008.

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

KARATAS, B.S.; AKKUZU, E.; UNAL, H.B.; ASIK, S.; AVCI, M. Using Satellite remote sensing to asses irrigation performance in water user Associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. **Agricultural Water Management**, v. 96, p.982-990, 2009.

KHAN, E.A.; SAGOO, A.G.; HASSAN, G. Physiological response of autumn planted sugarcane to soil moisture depletion and plant geometry on different soils under arid conditions. **Pakistan Journal of Botany**, v.43, n.4, p. 1965-1969, 2011.

KISI, O. Evapotranspiration modeling using a wavelet regression model. **Irrigation Science**, v.29, n.3, p.241-252, 2010.

LISSON, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modeling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, v. 92, p.321-335, 2005.

LIZASO, J.I.; MELENDEZ, L.M.; RAMIREZ, R. Earth flooding of two cultivars os tropical maize. I- Shoot and root growth. **Journal of Plant Nutrition**, v.24, p.979-995, 2001.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELLO, J.M.; JUAN, J.A. de; BALLESTEROS, R.; DOMÍNGUEZ, A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 190-198, 2010.

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

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação - Princípios e Métodos**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 355 p.

OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M.; AQUINO, L.A. de. **Manejo de irrigação**. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.) Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool – Tecnologias e perspectivas. Viçosa: UFV, p.217-244, 2010.

- SAGOO, A.G.; KHAN, E.A.; HIMYATULLAH, H; KHAN, M.A.; AHMAD, H.K. Morphological response of autumn planted sugarcane to available soil moisture depletion and planting geometry on different soils under arid conditions. **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 26, n.2, p.187-194, 2010.
- SANTANA, M.J.; CARVALHO, J.A.; ANDRADE, M.J. B.; BRAGA, J.C.; GERVÁCIO, G.G. Coeficiente de cultura e análise do rendimento do feijoeiro sob regime de irrigação. **Irriga**, v. 13, n. 1, p. 92-112, 2008.
- SANTOS, C.; LORITE, I.J.; TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; FERERES, E. Performance of an irrigation scheme using indicators determined with remote sensing techniques. **Irrigation Science**, n. 28, p. 461-477, 2010.
- SHRIVASTAVA, A.K.; SHRIVASTAVA, A.K.; SOLOMON, S. Sustaining sugarcane productivity under depleting water resources. **Current Science**, v.10, n.6, p. 748-754, 2011.
- SMIT, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.
- SOUZA, K.T.S. de. **Sensibilidade da primeira soca da cana-de-açúcar ao excesso de água no solo**. Tese (Doutorado em Ciências) – ESALQ/USP, Piracicaba, 86f. 2010.
- TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resource Management**, v.23, p. 3057-3067, 2009.
- TURCO, J.E.P., RIZZATTI, G.S., PAVANI, L.C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.29, n.2, p.311-320, 2009.

## **ARTIGO 4**

### **ÉPOCA DE INTERRUPÇÃO DA IRRIGAÇÃO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

#### **RESUMO**

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se avaliar indicadores de desenvolvimento, maturação e produção da cana-de-açúcar em função da época de interrupção da irrigação e seu efeito no estado hídrico e no IAF da cultura, visando economia de água e de energia elétrica. O experimento foi instalado em agosto de 2010 em Jaíba/MG, em uma área irrigada por pivô central, com cana-de-açúcar no terceiro ciclo, em estágio de maturação. O manejo da irrigação foi realizado até a época determinada para a sua interrupção, de acordo com cada tratamento, aos 51, 37, 22 e 7 dias antes da colheita, respectivamente, para os Tratamentos T1, T2, T3 e T4. Foram determinados o potencial hídrico de antemã nas folhas, o Brix e o índice de maturação, o IAF, a produtividade de colmos e o teor de sacarose do caldo. Com os dados de produtividade e do preço da cana, calculou-se os ganhos (R\$ ha<sup>-1</sup>) que se obtém por continuar irrigando a cultura até próximo à colheita. Os valores obtidos foram submetidos a análises de variância e, posteriormente, elaboradas regressões lineares e polinomiais quadráticas, conforme a variável, com uso do aplicativo SAEG 9.1. Diante dos resultados obtidos, nas condições em que foi realizado o experimento, foi possível concluir que: ocorreu antecipação da senescência foliar da cana-de-açúcar quando a irrigação foi interrompida no início da fase de maturação; a interrupção da irrigação da cana-de-açúcar até 51 dias antes da colheita promoveu decréscimo na produtividade de até 26 t ha<sup>-1</sup>; não houve acréscimo de rendimento industrial (ATR) com a manutenção da irrigação até próximo à colheita; não se recomenda interromper a irrigação para a cultura da cana-de-açúcar, antes de sete dias da colheita, com a finalidade de aumentar o teor de sacarose nos colmos.

## **PAPER 4**

### **TIME OF IRRIGATION INTERRUPTION FOR SUGARCANE**

#### **ABSTRACT**

This work evaluated the development, maturation and production of sugarcane as a function of time of irrigation interruption and its effect on water status and the IAF of the crop in order to save water and electricity. The experiment was installed in August 2010 in Jaíba/MG, Brazil, in an area irrigated by a center pivot system with sugarcane in the second ratoon, at maturity stage. Irrigation was managed until the interruption time determined according to each treatment, 51, 37, 22 and 7 days before harvest, respectively, for T1, T2, T3 and T4. Factors determined were water potential in the leaves, Brix and maturation index, the leaf area index, sugarcane yield and sucrose content. With productivity data and the price of sugarcane, estimated earnings (R\$ ha<sup>-1</sup>) were calculated for irrigating the culture until close to harvest. The values obtained were subjected to analysis of variance and subsequently linear and quadratic polynomial regressions were developed according to the variable, using the software SAEG 9.1. From the results at the conditions in which the experiment was conducted, it was concluded that: there was anticipation of leaf senescence in sugarcane when irrigation was discontinued in the early stage of maturation; the interruption of sugarcane irrigation at 51 days before harvest promoted a decrease in productivity of up to 26 t ha<sup>-1</sup>; there was no increase in industrial yield (ATR) by maintaining the irrigation until few days before harvest; it is not recommended to stop sugarcane irrigation at less than seven days before harvest in order to increase the sucrose content in the stems.

#### 4.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das relações hídricas é fundamental para melhorar o manejo da cultura da cana-de-açúcar nas regiões tropicais, sobretudo em razão do elevado déficit hídrico existente em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Assim, o uso eficiente da água na irrigação é uma das maneiras mais eficazes de melhorar o manejo da cultura, garantindo que o estresse hídrico seja minimizado durante as fases críticas de desenvolvimento. No entanto, a ocorrência de estresse hídrico durante a fase de maturação pode maximizar a produção de sacarose (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Chaves et al. (2008) citam que a deficiência hídrica afeta vários aspectos do metabolismo vegetal, em especial a fotossíntese. A fotossíntese das plantas é limitada pela restrição da abertura estomática em condição de déficit hídrico, que é a primeira linha de defesa, sendo ativada mesmo antes que ocorram reduções no conteúdo de água foliar (YORDANOV et al., 2003). Esta redução na abertura estomática ocorre para tentar reduzir a perda de água para a atmosfera (transpiração) e assim evitar a desidratação excessiva (MACHADO et al., 2009). Essa resposta adaptativa é promovida pelo fechamento parcial dos estômatos, que também afeta a disponibilidade de substrato (CO<sub>2</sub>) para a fotossíntese (FLEXAS et al., 2006; YORDANOV et al., 2003). Esse processo fisiológico, vital para as plantas, é então comprometido em condição de déficit hídrico, ocasionando decréscimos na produção de carboidratos que, posteriormente, seriam armazenados (SINGELS et al., 2005).

O fechamento precoce dos estômatos é uma das primeiras respostas de tolerância à seca. Isso ocorre porque, com um ligeiro secamento do solo, mesmo que não sejam afetadas as relações hídricas da parte aérea, há aumento na concentração do ácido abscísico (ABA) no xilema, que promove o fechamento estomático, fazendo com que a planta perca menos água pela transpiração (CHAVES et al., 2008; SANTOS; CARLESSO, 1998). No entanto, o fechamento estomático também restringe a troca de gases entre o interior da folha e a atmosfera, causando diminuição da assimilação de CO<sub>2</sub> e da fotossíntese, da produção de fotoassimilados e do acúmulo de massa e

sacarose (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; GAVA et al., 2010; SILVA; PINCELLI, 2010).

De acordo com Machado et al. (2009), a tolerância ao déficit hídrico é variável de acordo com a variedade e o estágio fenológico, ou seja, conforme a fase fenológica, o déficit hídrico pode ter maior ou menor impacto na produtividade agrícola (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SILVA et al., 2010). Segundo Casagrande (1991), a falta de água do solo pode prejudicar a brotação dos toletes, assim como o excesso causado pela irrigação, drenagem irregular e acúmulo de água de chuva.

Por outro lado, a deficiência hídrica durante o ciclo indutivo atrasa e reduz o florescimento (RODRIGUES, 1995). Segundo o autor, é recomendável interromper a irrigação na fase de maturação da cultura, em torno de três meses antes da colheita, de modo a evitar o florescimento e seus efeitos indesejáveis à qualidade industrial da matéria prima para a fabricação de açúcar e álcool. No entanto, cautela é necessária nessa prática, uma vez que o déficit hídrico prolongado pode reduzir a produtividade de colmos e açúcares da cana-de-açúcar.

Para fins de irrigação, o período de maior suscetibilidade ao déficit hídrico é o do rápido desenvolvimento da cultura, quando as plantas apresentam grande área foliar e necessitam de maior quantidade de água para realização de troca de gases com a atmosfera (PIRES et al., 2008). Inman-Bamber; Smith (2005) relatam que a suscetibilidade da cana-de-açúcar à deficiência hídrica é maior quando as plantas estão na fase de alongamento dos colmos, o que causa sérios prejuízos na produção de fitomassa e no rendimento de sacarose (SILVA; COSTA, 2004). Ramesh; Mahadevaswamy (2000) consideram a fase de formação da cana-de-açúcar como de alta demanda hídrica, que compreende os períodos de perfilhamento e de rápido crescimento.

Segundo Doorenbos; Kassam (1979), dependendo do clima, a quantidade de água que a cultura necessita varia de 1.500 e 2.500 mm anuais. Nas áreas canavieiras do Brasil, o total de precipitação anual varia de 1.100 a 1.500 mm por ano (ALFONSI et al., 1987). Assim, segundo Dantas Neto et al. (2006), para se obter altas produtividades, é imprescindível o uso da tecnologia de irrigação.

De acordo com Inman-Bamber; Smith (2005), uma precipitação pluvial anual a partir de 1.000 mm, bem distribuída, é suficiente para a obtenção de altas produções na cana-de-açúcar. Isso implica que o manejo de água seja realizado com eficiência, com suprimentos adequados durante o crescimento vegetativo (principalmente nas fases de germinação, perfilhamento e alongamento dos colmos) e alguma restrição no período de

maturação, para forçar o repouso fisiológico e o enriquecimento de sacarose. Silva et al. (2012) sugerem que, para a cana-de-açúcar irrigada no semi-árido brasileiro, o requerimento hídrico é de 1.710 mm no ciclo anual da cultura.

Smit; Singels (2006); Machado et al. (2009) e Inman-Bamber (2004) verificaram aumento da senescência e redução da área foliar da cana-de-açúcar devido ao estresse hídrico, que ocorre quando o solo seco limita o fornecimento de nitrogênio suficiente para suprir a necessidade de crescimento da cultura, ocorrendo translocação do elemento das folhas mais velhas para os pontos de crescimento (SILVA; PINCELLI, 2010). O aumento da senescência do dossel vegetativo tem sido identificado como uma limitação potencial na produtividade da cana-de-açúcar, sendo um mecanismo de fundamental influência na produção final, pois reduz a área fotossinteticamente ativa das plantas (SANTOS; CARLESSO, 1998).

De acordo com Alonso (2006), para que ocorra melhor maturação, maior e mais rápida concentração de sacarose nos colmos, é imprescindível que, imediatamente antes ou logo no início do período de moagem, ocorram redução da temperatura ambiente e menores ou mesmo ausência de precipitações.

Teixeira (2009) estudou o acúmulo de sacarose (medido pelo açúcar total recuperável - ATR) pela cana-de-açúcar em função da interrupção da irrigação (*drying-off*) de 10 até 40 dias antes da colheita, não observando diferença estatística entre os tratamentos. Porém, Robertson e Donaldson (1998) estudaram os efeitos de interrupção da irrigação no período pré-colheita da cana-de-açúcar e observaram que houve aumento da concentração de sacarose (peso seco) sob *drying-off*, significando que o rendimento de sacarose é geralmente aumentado ou inalterado para as reduções na biomassa da cana até cerca de 10%. Passado esse limite, o rendimento de sacarose começa a cair.

Delgado-Rojas; Barbieri (1999), estudando dados de produtividade de 11 anos de produção (1975-1984) para a região de Araras-SP, observaram que a aplicação de água no período de maturação não acarretou acréscimos na produtividade de colmos e açúcar.

Diante do exposto, desenvolveu-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar indicadores de desenvolvimento, maturação e produção da cana-de-açúcar em função da época de interrupção da irrigação e seu efeito no estado hídrico e no enfolhamento da cultura, visando economia de água e de energia elétrica, sem, no entanto, comprometer a produtividade e o rendimento industrial.

## 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em agosto de 2010 na fazenda pertencente à SADA Bioenergia e Agricultura, localizada no município de Jaíba, latitude 15° 12' S, longitude 43° 56' W e altitude de 478 m, em uma área irrigada, com cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) cultivar RB 86-7515, de ciclo tardio, no terceiro ciclo (segunda soqueira) em estágio de maturação, onde eram realizados todos os tratos culturais (capinas, adubação, controle fitossanitário) no decorrer do ciclo. O manejo da irrigação foi realizado até a época determinada para a interrupção da irrigação de acordo com cada tratamento. A descrição da área experimental e do equipamento é apresentada no Artigo 1.

As propriedades do solo e as características da cultura cadastradas no aplicativo (*Irriger*<sup>®</sup>), para o manejo da irrigação, são apresentadas no Quadro 4.1.

**Quadro 4.1** – Propriedades do solo e características da cultura

Solo						
Profundidade	<sup>1</sup> CC	<sup>2</sup> PMP	Densidade	Argila	Areia	Silte
(cm)	(%)	(%)	(g cm <sup>-3</sup> )	(%)	(%)	(%)
0-50	10,1	4,5	1,6	12	83	5
Cultura						
Ciclo	Fase	Duração	<sup>3</sup> Kc	<sup>4</sup> Z	Área Sombreada	<sup>5</sup> f
		(dias)		(cm)	(%)	
Soca 2	Brotação	20	0,40	0,3	15	0,7
Soca 2	Perfilhamento	80	0,70	0,5	50	0,7
Soca 2	Desenvolvimento	240	1,25	0,5	100	0,7
Soca 2	Maturação	27	0,80	0,5	100	0,7

<sup>1</sup>Capacidade de campo a 10 kPa; <sup>2</sup>Ponto de murcha permanente; <sup>3</sup>Coefficiente cultural; <sup>4</sup>Profundidade efetiva do sistema radicular; <sup>5</sup>Fator de disponibilidade hídrica

A área irrigada pelo pivô central foi dividida em quatro sub-áreas em forma de quadrantes para a instalação dos tratamentos apresentados no Quadro 4.2. O

experimento foi conduzido no delineamento em faixas, tendo quatro tratamentos e quatro repetições.

**Quadro 4.2** - Dias que antecederam a colheita para promover a interrupção da irrigação, precipitação efetiva, lâminas totais de irrigação aplicadas e lâminas totais no ciclo da cultura em cada tratamento

<b>Tratamento</b>	<b>Dias que antecederam a colheita</b> (dias)	<b>Precipitação efetiva</b> (mm)	<b>Irrigação total</b> (mm)	<b>Lâmina total</b> (mm)
1	51	473,2	988,5	1461,7
2	37	473,2	1060,4	1533,6
3	22	473,2	1132,5	1605,7
4	07	473,2	1212,5	1685,7

As parcelas possuíam 12 m de comprimento com 5 linhas de cana, tendo como área útil as três linhas centrais com comprimento de 10 m. Considerou-se, para o cálculo da lâmina total de água aplicada no ciclo, a soma entre a irrigação total e a precipitação efetiva. A irrigação total foi obtida pela soma das irrigações realizadas. A precipitação efetiva foi calculada, sempre que a precipitação total excedeu a 25 mm, subtraindo-se, da precipitação total, o excesso, que é a soma do escoamento superficial calculado pelo modelo SCS-USA e da lâmina calculada a cada evento de irrigação através do balanço hídrico diário. Não se utilizou valores de precipitação efetiva maiores que a capacidade total de armazenamento de água do solo (43,7 mm).

A irrigação foi interrompida nos dias 15 e 29 de agosto para os tratamentos T1 e T2, respectivamente, e nos dias 13 e 28 de setembro, para os tratamentos T3 e T4, respectivamente, no ano 2010. A colheita da cana para todos os tratamentos ocorreu no dia cinco de outubro, com isso, as plantas dos tratamentos T1, T2, T3 e T4 ficaram, respectivamente, 51, 37, 22 e 7 dias sem irrigação ou chuva (dsi).

Foram determinados o potencial hídrico de antemã nas folhas, o Brix e o índice de maturação, o índice de área foliar, a produtividade de colmos e o teor de sacarose do caldo. Os métodos de determinação do potencial hídrico foliar e do índice de área foliar são descritos no Artigo 2. O Brix e o índice de maturação das plantas foram avaliados usando um refratômetro de campo digital. Em cada parcela, foram tomadas três plantas, aleatoriamente, e destas, extraídas gotas de caldo, com um trado perfurador, dos terceiros internódios a partir do solo e da ponta (último internódio que a bainha desprende-se facilmente do colmo). A relação existente entre o Brix da ponta e o Brix da base, indicou o índice de maturação (IM) pelos seguintes valores: menor que

0,60 – cana verde; 0,60 a 0,70 – maturidade baixa; 0,70 a 0,84 – maturidade média; 0,85 a 1,00 – cana madura; e maior que 1,00 – declínio da maturação.

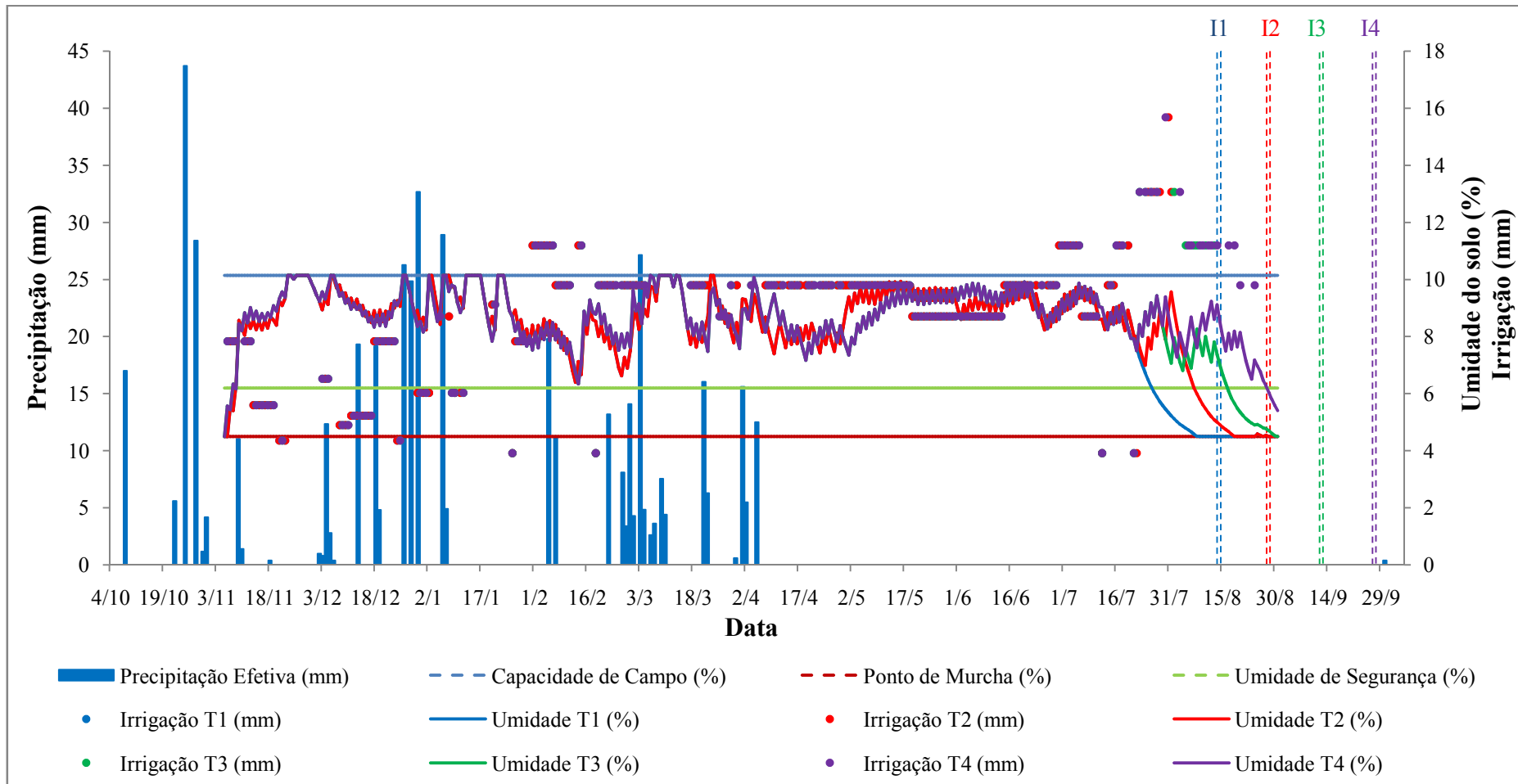
As colheitas dos colmos foram realizadas manualmente, cortando-se uma fileira de 10 metros lineares nas parcelas úteis de cada tratamento. Após cada colheita, as amostras foram pesadas em dinamômetro e determinadas as massas (kg) da produção de cada parcela de 15 m<sup>2</sup>, sendo o resultado obtido convertido em toneladas de cana por hectare (t ha<sup>-1</sup>), considerando-se o espaçamento entre fileiras de 1,50 m. Em cada parcela foram retirados três colmos, aleatoriamente, e enviados ao laboratório para a realização das análises de rendimento industrial. Os procedimentos laboratoriais de determinação do ATR são descritos no Artigo 1.

Com os dados de produtividade e do preço da cana, calculou-se os ganhos (R\$ ha<sup>-1</sup>), que se obtém por continuar irrigando a cultura. Com o custo unitário da irrigação (R\$ mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>) (considerando-se energia elétrica, água, consultoria, mão-de-obra, encargos e depreciação dos equipamentos) e a lâmina de irrigação aplicada (mm) além do período de interrupção da irrigação do tratamento T1, calculou-se o custo a mais para manter a irrigação até próximo à colheita. O preço da cana foi obtido na União dos Produtores de Bioenergia (UDOP), considerando-se a média dos preços mensais praticados entre os meses de novembro de 2010 a outubro de 2011. Os custos de água e energia elétrica foram obtidos a partir de contas de energia elétrica e água, fornecidas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e pelo Distrito de Irrigação de Jaíba (DIJ), respectivamente. Os demais custos foram obtidos junto à administração da Fazenda. O custo unitário de lâmina de irrigação totalizou em R\$ 1,56 mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>.

Os valores obtidos nas repetições foram submetidos a análises de variância e, posteriormente, elaboradas regressões com uso do aplicativo SAEG 9.1. Os coeficientes encontrados para as equações de regressão foram submetidos ao teste t, com posterior correção, considerando-se o Quadrado Médio do Resíduo e os Graus de Liberdade da ANOVA e o Quadrado Médio Independente da Regressão. Foram adicionados os Intervalos de Confiança da Regressão, ao nível de 95% de probabilidade, utilizando o aplicativo SigmaPlot 11.0.

### **4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

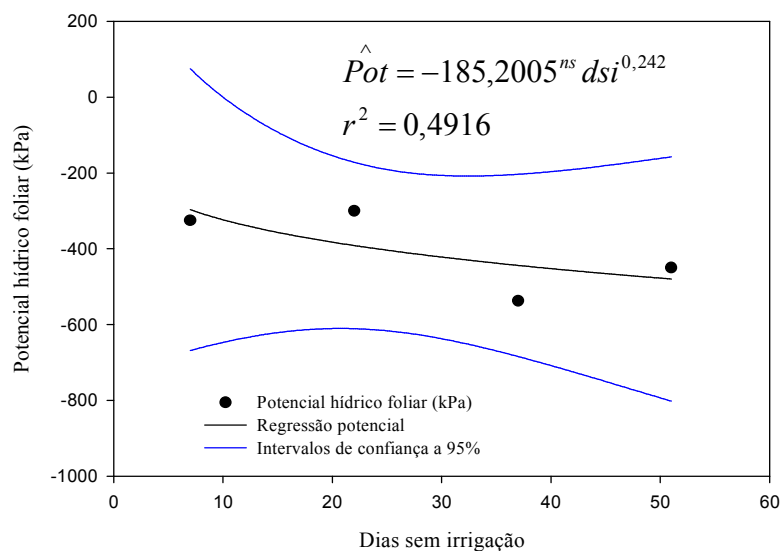
Na Figura 4.1 são apresentados o balanço hídrico, que representa o manejo da irrigação, as épocas de interrupção da irrigação, I1, I2, I3 e I4, respectivamente para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, os limites superior (capacidade de campo) e inferior (ponto de murcha permanente) de armazenamento de água no solo, a precipitação, as irrigações realizadas e a umidade do solo para os tratamentos durante a safra 2009/2010.



**Figura 4.1** – Balanço hídrico, limites de armazenamento de água no solo e épocas de interrupção da irrigação para o manejo da cultura da cana-de-açúcar durante a safra 2009/2010.

Observa-se que o período chuvoso encerrou-se no dia 06/04/2010, fazendo com que a cultura ficasse totalmente dependente da irrigação, para o suprimento de água, durante 182 dias. A umidade do solo atingiu a umidade de segurança (fator “f”) nos dias 22/08, 06/09, 18/09 e 02/10, respectivamente, para os tratamentos T1, T2, T3 e T4. A umidade do solo, equivalente ao ponto de murcha permanente (PM), foi alcançada nos dias 07/09, 20/09 e 04/10, respectivamente, para os tratamentos T1, T2 e T3. Para o tratamento T4 essa umidade não foi alcançada. Com isso, os tratamentos T1, T2, T3 e T4 ficaram, respectivamente, 16, 14, 16 e 4 dias com a umidade do solo entre a umidade de segurança e o PMP e 29, 16, 2 e 0 dias no PM. Os Tratamentos T1, T2, T3 e T4 permaneceram 45, 30, 18 e 4 dias, respectivamente, em condições de estresse hídrico (umidade do solo abaixo da umidade de segurança). Os valores de umidade do solo medidas, para aferição, foram próximos dos calculados pelo aplicativo.

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados de potencial hídrico de antemanhã, medidos entre cinco e seis horas, da cultura da cana-de-açúcar, para os tratamentos, em função do tempo que permaneceram sem irrigação. Nota-se tendência de redução do potencial hídrico foliar para maiores períodos secos, que promovem alterações no estado hídrico das plantas, indicando que estavam sob deficiência hídrica.

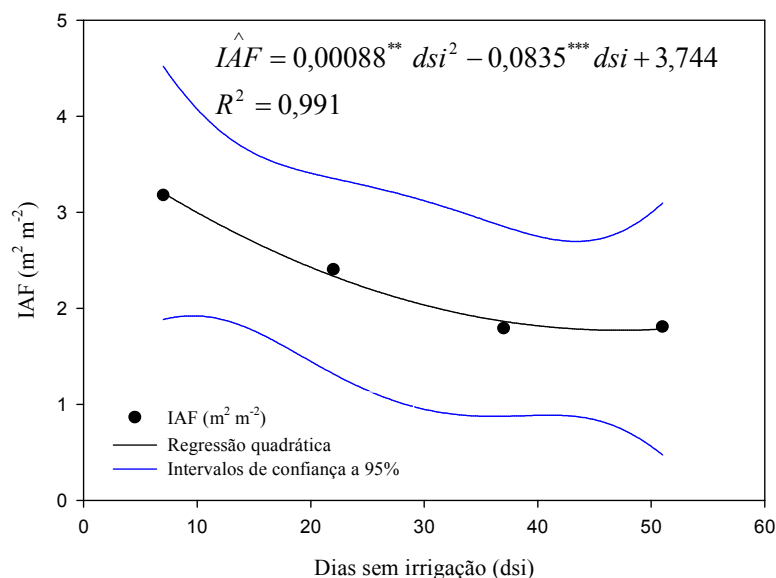


<sup>ns</sup> Não significativo pelo teste “t”.

**Figura 4.2** – Potencial hídrico de antemanhã, medidos entre cinco e seis horas, da cultura da cana-de-açúcar, para os tratamentos, em função dos dias sem irrigação, equação de regressão linear e intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade.

Silva (2010) encontrou valores de potencial hídrico foliar de antemanhã, em seis cultivares de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica, variando entre 160 e 240 kPa, com maiores valores para os tratamentos com maior restrição hídrica às plantas. Machado et al. (2009) encontraram valores de 180 e 730 kPa, para plantas de cana-de-açúcar de primeiro ciclo, submetidas a boas condições de disponibilidade hídrica e ao déficit hídrico 14 dias após a suspensão da irrigação, respectivamente, ambas na fase de maturação (300 dias após o plantio). Estes valores se mostraram mais próximos aos encontrados no presente trabalho, se comparados os obtidos por Silva (2010).

Na Figura 4.3 é apresentada a evolução do índice de área foliar durante o experimento. Observa-se que os tratamentos que permaneceram maior tempo sem irrigação, apresentaram plantas com menores índices de área foliar. Isso ocorreu devido à antecipação do processo de senescência foliar nestes tratamentos, provocada pela deficiência hídrica, como também foi observado por Smit; Singels (2006); Machado et al. (2009) e Inman-Bamber (2004).

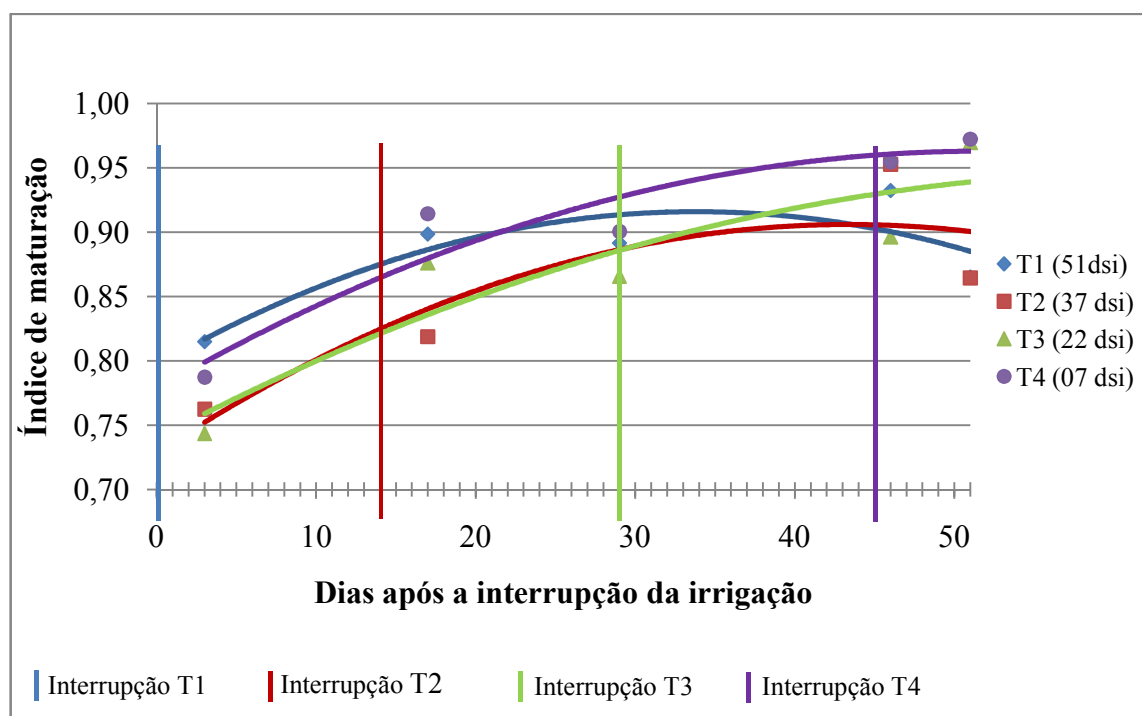


\*\*\* Significativo ao nível de 1%; \*\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “t”.

**Figura 4.3** – Índice de área foliar ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) para os tratamentos na época de colheita, equação de regressão quadrática e intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade.

Na Figura 4.4 é apresentada a evolução do Índice de Maturação (IM) a partir dos 51 dias antes da colheita, além das épocas de interrupção da irrigação para os quatro

tratamentos. Os tratamentos T3 e T4 (22 e 07 dsi, respectivamente) apresentaram tendência de crescimento do IM até o momento da colheita, atingindo os maiores valores de índice de maturação, além de estarem na segunda avaliação, acima de 0,85, indicando que a cana estava madura. O tratamento T2 apresentou tendência de crescimento até os sete dias antes da colheita, com declínio a partir deste ponto. O tratamento T1 apresentou a mesma tendência do T2, porém com antecipação do declínio da curva de maturação, havendo maior decaimento a partir dos 15 dias antes da colheita. Todos os tratamentos apresentaram o índice de maturação acima de 0,85 na última avaliação, época da colheita.



**Figura 4.4** – Evolução dos índices de maturação a partir dos 51 dias antes da colheita e épocas de interrupção da irrigação para cada tratamento.

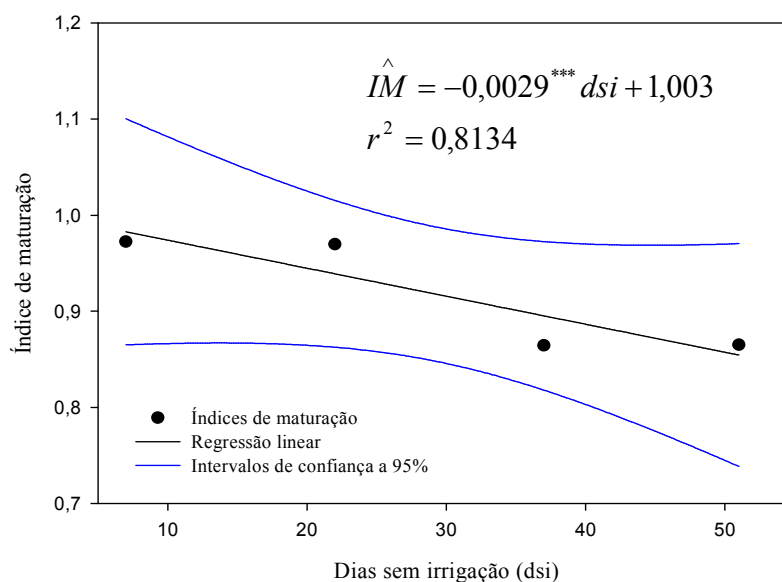
No Quadro 4.3 são apresentadas as equações de regressão dos índices de maturação em função dos dias sem irrigação (dsi), suas significâncias pelo teste “t” e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Apesar de não haver significância dos valores de  $\beta_2$  para as equações referentes aos tratamentos com 37, 22 e 07 DSI, optou-se por manter o modelo quadrático, em função da tendência de decréscimo dos valores de índice de maturação, à medida que se aumenta o período em que a cultura ficou sem fornecimento de água.

**Quadro 4.3** – Equações de regressão dos índices de maturação em função dos dias sem irrigação (DSI), suas significâncias pelo teste “t” e coeficientes de determinação

Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
$\hat{IM}_{51} = -0,000104^* DSI^2 + 0,0071^{**} DSI + 0,7965$	$R^2 = 0,7322$
$\hat{IM}_{37} = -0,000094^{ns} DSI^2 + 0,0082^* DSI + 0,7284$	$R^2 = 0,7876$
$\hat{IM}_{22} = -0,000051^{ns} DSI^2 + 0,0065^* DSI + 0,7398$	$R^2 = 0,8340$
$\hat{IM}_{07} = -0,000069^{ns} DSI^2 + 0,0071^* DSI + 0,7783$	$R^2 = 0,8952$

\*\*Significativo ao nível de 5%; \*Significativo ao nível de 10% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não Significativo pelo teste “t”.

Na Figura 4.5 são apresentados os valores de índice de maturação para os tratamentos no período da colheita. Observa-se tendência de decréscimo dos valores do índice de maturação à medida que se aumentou o período em que a cultura ficou sem fornecimento de água.



\*\*\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”.

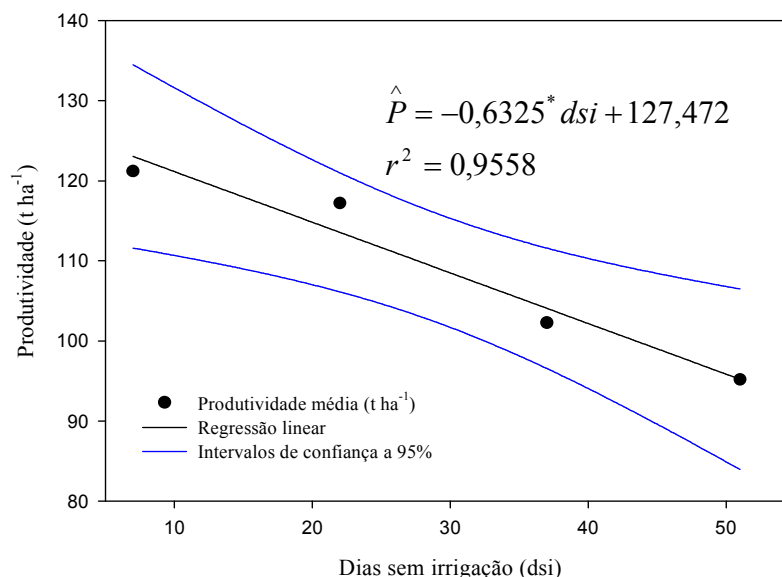
**Figura 4.5** – Índice de maturação durante o estágio final da cultura, equação de regressão linear e intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade.

O decréscimo observado no índice de maturação para os tratamentos que permaneceram maior período sob deficiência hídrica está associado ao menor enfolhamento da cultura (apresentado na Figura 4), visto que a restrição hídrica afeta diretamente o desenvolvimento foliar (INMAN-BAMBER, 2004; SMIT; SINGELS, 2006; MACHADO et al. 2009) e, com isso, ocorre menor interceptação de radiação solar e também menor acúmulo de matéria seca, devido à redução da capacidade fotossintética da planta (HEERDEN et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2005). Esse processo fisiológico é comprometido pela deficiência hídrica, ocasionando decréscimos na produção de carboidratos que posteriormente seriam armazenados (MCCORMICK et al., 2008; MOORE, 2005; RAE et al., 2005; SINGELS et al., 2005). Diola; Santos (2010) afirmam que o processo de acúmulo de açúcares pode ser intensificado em deficiência hídrica, no entanto, entrenós super amadurecidos (com alto conteúdo de fibra) não retêm apreciável quantidade de açúcar.

Segundo Machado et al. (2009), em condições de deficiência hídrica, ocorre redução de matéria seca do colmo da cana-de-açúcar e do conteúdo de sólidos solúveis devido à redução da fotossíntese e, conseqüentemente, da produção de sacarose.

Em trabalho conduzido por Duarte (2009), observou-se que o Brix da cana-de-açúcar, na região Norte de Minas Gerais, aumenta rapidamente até o mês de julho, continuando a aumentar mais lentamente até outubro, e caindo a partir daí até dezembro. Esses dados estão de acordo com os encontrados no presente trabalho, evidenciando a queda dos valores de Brix no final do ciclo da cana-de-açúcar, em condições de deficiência hídrica. Estes resultados são válidos para cana-de-açúcar de ciclo tardio no final do ciclo.

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados de produtividade de colmos, em toneladas por hectare, da cultura da cana-de-açúcar, para os tratamentos, em função do tempo que permaneceram sem irrigação. A maior produtividade ( $121,2 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi obtida quando se manteve a irrigação até próximo à colheita e, à medida que se aumentou o período seco, as produtividades foram reduzidas, obtendo-se  $117,2$ ;  $102,3$  e  $95,2 \text{ t ha}^{-1}$  para os tratamentos com 22, 37 e 51 dias secos, respectivamente. Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Robertson; Donaldson (1998) e discordam dos resultados obtidos por Delgado-Rojas; Barbieri (1999) e Teixeira (2009).



\*Significativo ao nível de 10% de probabilidade pelo teste “t”.

**Figura 4.6** – Produtividade de colmos de cana-de-açúcar para os tratamentos, equação de regressão linear e intervalos de confiança ao nível de 95% de probabilidade.

Os valores médios de ATR (kg t<sup>-1</sup>) obtidos no momento da colheita foram 168,6; 172,4; 171,8 e 175,0 para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente, não apresentando diferença significativa entre si.

Interrompendo-se a irrigação 51 (T1) dias antes da colheita, houve uma redução de 223,7 mm na lâmina total de irrigação aplicada no ciclo da cultura, representando uma economia de 18,4%. Para os tratamentos T2 e T3, houve uma redução da lâmina de 152,1 e 80 mm, respectivamente, equivalentes a 12,6 e 6,6% de economia. No entanto, considerando-se um custo de irrigação estimado em R\$ 1,56 mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, e o preço da cana em R\$ 45,00 t<sup>-1</sup> (UDOP, 2011), tem-se um aumento da receita em R\$ 1.747,00 ha<sup>-1</sup>, com aumento do custo (em função da maior lâmina aplicada) de R\$ 348,00 ha<sup>-1</sup>, resultando em renda líquida de R\$ 1.399,00 ha<sup>-1</sup>. Como não houve diferença entre os valores de ATR, não se recomenda interromper a irrigação antes de sete dias da colheita, com a finalidade de aumentar o teor de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar. Tal afirmação é válida para o preço mínimo da cana-de-açúcar de R\$ 9,00 t<sup>-1</sup>, para a *cultivar* RB 86 7515, de ciclo tardio, colhida no início de outubro.

#### 4.4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, para a cultivar RB 86-7515, colhida no início de outubro, nas condições em que foi realizado o experimento, é possível concluir que: ocorreu antecipação da senescência foliar da cana-de-açúcar quando a irrigação foi interrompida no início da fase de maturação; a interrupção da irrigação da cana-de-açúcar até 51 dias antes da colheita promoveu redução na produtividade de até  $26 \text{ t ha}^{-1}$ ; não houve acréscimo de rendimento industrial (ATR) com a manutenção da irrigação até próximo à colheita; não se recomenda interromper a irrigação para a cultura da cana-de-açúcar, antes de sete dias da colheita, com a finalidade de aumentar o teor de sacarose nos colmos.

#### 4.5. BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ALFONSI, R.R.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. **Condições climáticas para a cana-de-açúcar**. In: Paranhos, S. B. (ed.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1, p.42-55.

ALONSO, A. **Estratégias para melhorar a qualidade da cana-de-açúcar para a indústria**. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C. M. de. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: ESALQ/USP. p.361-367. 2006.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: Funep, 1991. 157p.

CHAVES, M.M; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, p. 551-560, 2008.

DANTAS NETO, J.; FIGUERDO, J.L.C.; FARIAS, C.H.A.; 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**, v.10, n.2, p.283-288, 2006.

DELGADO-ROJAS, J.S.; BARBIERI, V. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.67-73, 1999.

DIOLA, V.; SANTOS, F. **Fisiologia**. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.) Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool – Tecnologias e perspectivas. Viçosa: UFV, p.25-49, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO, Irrigation and Drainage Paper, 33).

DUARTE, A.M.A. **Crescimento e maturação da cana-de-açúcar, sob condições de cultivo irrigado, em Janaúba-MG**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 57 f. 2009.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; BOTA, J. G. GALMES, J.; HENKLE, M.; MARTINEZ-CANELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO<sub>2</sub> concentration. **New Phytologist**, v.172, p. 73-82, 2006.

GAVA, G.J. de C.; KÖLLN, O.T.; URIBE, R.A.M.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H. **Interação entre água e nitrogênio na produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*)**. In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 49-66, 2010.

HEERDEN, P.D.R. van; DONALDSON, R.A.; WATT, D.A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v.61, n.11, p.2877-2887, 2010.

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

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

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

MCCORMICK, A.J.; CRAMER, M.D.; WATT, D.A. Culm sucrose accumulation promotes physiological decline of mature leaves in ripening sugarcane. **Field Crops Research**, v. 108, p. 250-258, 2008.

MOORE, P.H. Integration of sucrose accumulation processes across hierarchical scales: towards developing an understanding of the genetic-crop continuum. **Field Crops Research**, v. 92, p. 119-135, 2005.

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

PIRES, R.C.M.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E. **Irriga o e drenagem**. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G. de A. (Ed.). Cana-de-a ugar. Campinas: Instituto Agronômico, p.631-670. 2008.

RAE, A.L.; GROF, C.P.L.; CASU, R.E.; BONNETT, G.D. Sucrose accumulation in the sugarcane stem: pathways and control points for transport and compartmentation. **Field Crops Research**, v. 92, p. 159-168, 2005.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.185, n.4, p.249-258, 2000.

ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, M.J. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off before harvest. **Field Crops Research**, v.55, p.201-208, 1998.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: UNESP. 1995. 101 p.

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

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

SILVA, T.G.F. da; MOURA, M.S.B. de; SOARES, J.M.; VIEIRA, V.J. de; JÚNIOR, W.G.F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.1, p.64-71, 2012.

SILVA, M. de A.; PINCELLI, R.P. **Alterações morfofisiológicas na cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica**. In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 43-48, 2010.

SILVA, M. de A.; SANTOS, C.M.dos; ARANTES, M.T.; PINCELLI, R.P. **Fenologia da cana-de-açúcar**. In: CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M. de A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. Tópicos em Ecofisiologia da Cana-de-Açúcar. Botucatu: FEPAF. p. 8-21, 2010.

SILVA, P.B. da. **Aspectos fisiológicos de seis genótipos de cana-de-açúcar submetidos a estresse hídrico**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal e Produção de Plantas) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 89 f. 2010.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v.92, p. 291-303, 2005.

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

TEIXEIRA, E. N. **Interceptação de água pelo dossel e influência da época da irrigação na qualidade da cana de açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 59 f. 2009.

UDOP - União dos Produtores de Bioenergia. **Indicadores de Mercado: Cana-de-açúcar**. Disponível em: <[http://www.udop.com.br/graficos/cana\\_campo\\_pr.php](http://www.udop.com.br/graficos/cana_campo_pr.php)> Acesso em: 21 de nov. 2011.

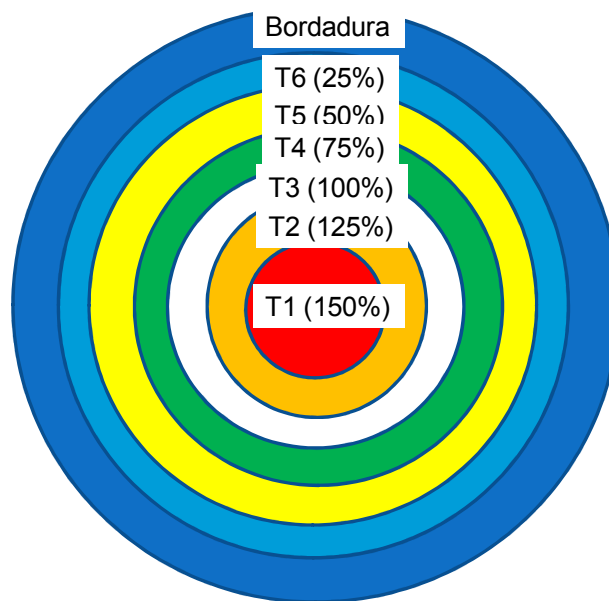
YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, Special Issue, p. 187-206, 2003.

## CONCLUSÕES GERAIS

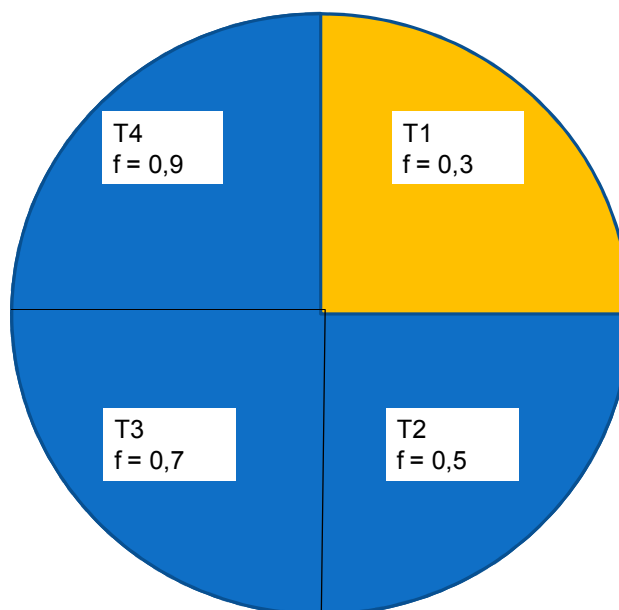
Com os resultados obtidos, para cana-de-açúcar cultivar RB 86-7515, de ciclo tardio, nas condições em que foi realizado o experimento, no semi-árido norte mineiro, foi possível concluir que: apesar de se atingir a produtividade máxima da cultura ( $112,3 \text{ t ha}^{-1}$ ) com  $1.537,2 \text{ mm}$  de água no ciclo da cultura, o máximo rendimento econômico ( $108,5 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi obtido com a lâmina de  $1.333,8 \text{ mm}$ . A lâmina que proporcionou a maior produtividade de açúcares ( $17,56 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi de  $1.508,4 \text{ mm}$ . O melhor rendimento econômico, em termos de açúcares por unidade de área, foi de  $17,4 \text{ t ha}^{-1}$  (Lâmina recomendada), com fornecimento de  $1.406 \text{ mm}$  de água, resultando na necessidade de  $808 \text{ m}^3$  de água para se produzir uma tonelada de açúcar. Lâminas de irrigação maiores que  $1.000 \text{ mm}$  promoveram teores de dextrana acima dos limites estabelecidos para produção de açúcar. Recomenda-se para as indústrias de etanol e, principalmente de açúcar, introduzirem as análises de dextrana na rotina laboratorial. Houve tendência de aumento do índice de área foliar (IAF) da cana-de-açúcar à medida que se aumentou a lâmina de irrigação no ciclo da cultura; o aumento do IAF foi mais acentuado nos tratamentos que receberam mais água; o potencial hídrico foliar foi menor para menores lâminas de irrigação, com destaque para o tratamento que recebeu menos água (25%); a temperatura foliar foi próxima à temperatura do ar nos tratamentos que receberam as maiores lâminas (100 a 150%), com tendência de aumento da diferença entre a temperatura das folhas, à medida que se reduziu o suprimento hídrico; houve tendência de aumento do índice de clorofila (ICF) à medida que se aumentou as lâminas, com leve queda nos tratamentos que receberam lâminas maiores que 100% da ETc. Ao se irrigar a cana com “f” 0,7, obteve-se 17% de redução da evapotranspiração da cultura, se comparado ao “f” 0,5; não se recomenda irrigar a cultura com “f” 0,3, visto que se aumenta o consumo de água em 20% se comparado ao “f” 0,5 e não se obtém aumento da produtividade de colmos e de açúcares; os maiores valores de EUA foram encontrados, com a lâmina de  $1.540 \text{ mm}$ , para as produtividades de colmos ( $8,29 \text{ kg m}^{-3}$ ) e de açúcares ( $1,22 \text{ kg m}^{-3}$ ); recomenda-se “f” de 0,5 no manejo da

irrigação, visando maximizar a eficiência e uso de água para produtividades de colmos e açúcares; O maior rendimento de açúcares por área se deu no tratamento T2, com 18,73 t de açúcar por hectare, seguido de T1, com 17,06 t ha<sup>-1</sup>, T3 com 15,18 t ha<sup>-1</sup> e T4, com 12,97 t ha<sup>-1</sup>. São necessários estudos que avaliem o comportamento da cana-de-açúcar em solos de textura argilosa e arenosa, com o manejo da irrigação feito em diferentes fatores “F”. Ocorreu antecipação da senescência foliar da cana-de-açúcar quando a irrigação foi interrompida no início da fase de maturação; a interrupção da irrigação da cana-de-açúcar até 51 dias antes da colheita promoveu decréscimo na produtividade de até 26 t ha<sup>-1</sup>; não houve acréscimo de rendimento industrial (ATR) com a manutenção da irrigação até próximo à colheita; não se recomenda interromper a irrigação para a cultura da cana-de-açúcar, antes de sete dias antes da colheita, com a finalidade de aumentar o teor de sacarose nos colmos.

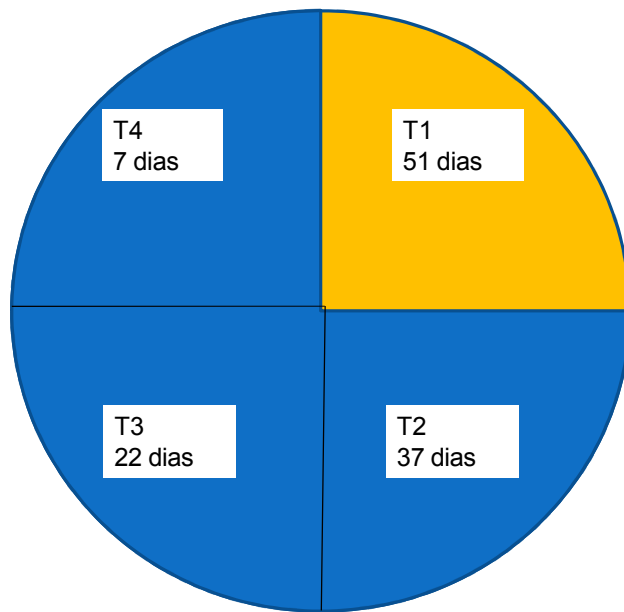
## **ANEXO**



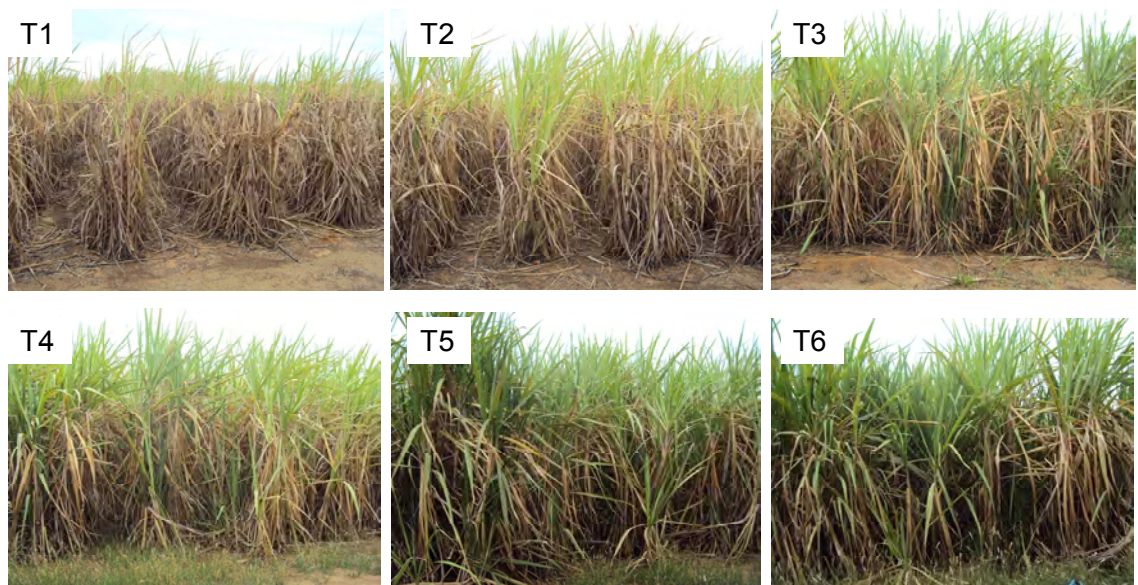
**Figura 1.A** – Disposição dos tratamentos do experimento de lâminas de irrigação (Artigos 1 e 2).



**Figura 2.A** – Disposição dos tratamentos do experimento de água disponível no solo-fator "f" (Artigo 3).



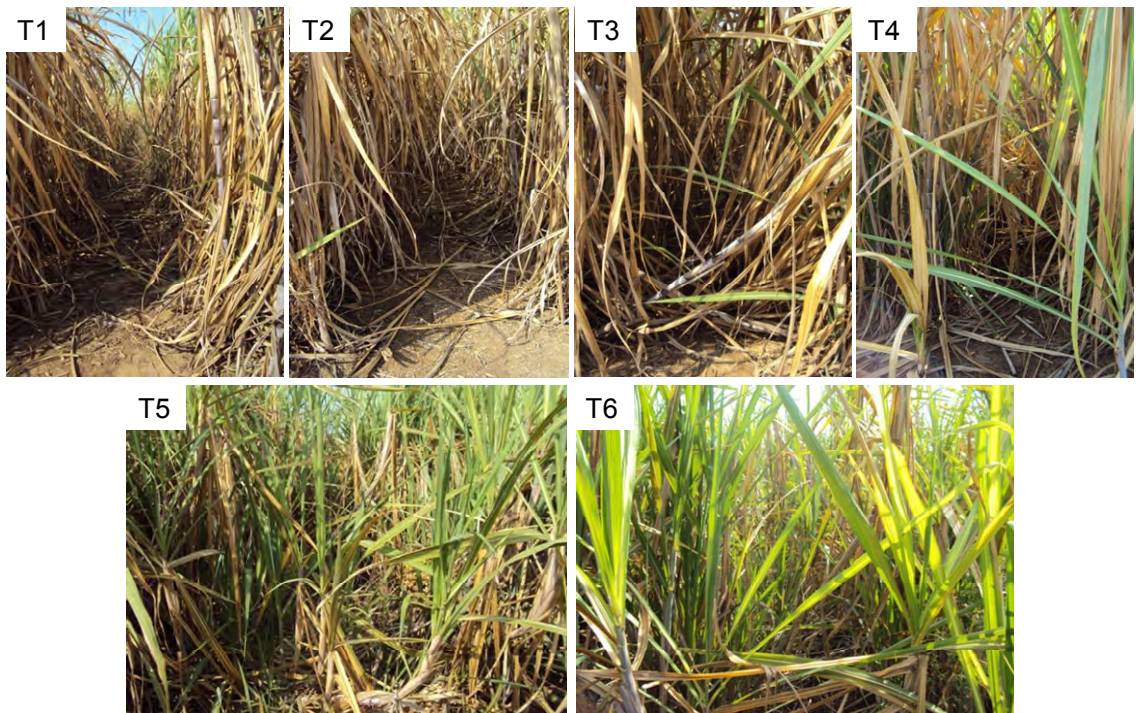
**Figura 3.A** – Disposição dos tratamentos do experimento de épocas de interrupção da irrigação (Artigo 4).



**Figura 4.A** – Vista geral das parcelas do experimento de lâminas de irrigação (Artigos 1 e 2) em 05 de outubro de 2011, véspera da colheita.



**Figura 5.A** – Alagamento ocorrido nas áreas com maior precipitação do experimento de lâminas de irrigação (Artigos 1 e 2).



**Figura 6.A** – Acamamento ocorrido nas parcelas do experimento de lâminas de irrigação (Artigos 1 e 2).

**Tabela 1.A - Análises de Solo do experimento de lâminas de irrigação (Artigos 1 e 2)**

Identificação 3005	lado A		lado A		lado B		lado B		lado C		lado C		lado D		lado D	
	0-20 cm		20-40 cm		baixada 0-20 cm		baixada 20-40 cm		0-20 cm		20-40 cm		0-20 cm		20-40 cm	
<b>Macronutrientes</b>																
pH água	6,54	A	5,51	B	5,38	Bx	5,58	B	6,57	A	5,28	Bx	4,81	Bx	5,25	Bx
M.O. dag/kg	1,50	Bx	0,10	M Bx	1,60	Bx	0,50	M Bx	1,20	Bx	0,30	M Bx	1,30	Bx	0,30	M Bx
P mg/dm <sup>3</sup>	18,1		1,3		26,0		2,1		7,7		0,7		13,9		2,5	
K mg/dm <sup>3</sup>	56	M	24	Bx	72	B	26	Bx	34	Bx	34	Bx	24	Bx	32	Bx
Ca cmolc/dm <sup>3</sup>	1,75	M	0,97	Bx	2,66	B	1,16	Bx	2,54	B	2,07	M	2,42	B	1,02	Bx
Mg cmolc/dm <sup>3</sup>	0,00	M Bx	0,00	M Bx	0,00	M Bx	0,00	M Bx	0,00	M Bx	0,00	M Bx	0,00	M Bx	0,00	M Bx
Al cmolc/dm <sup>3</sup>	0,00	M Bx	0,5	B	0,0	M Bx	0,4	B	0,0	M Bx	0,9	M	0,0	M Bx	0,6	M
H + Al cmolc/dm <sup>3</sup>	1,40	Bx	2,1	Bx	1,6	Bx	2,1	Bx	1,9	Bx	2,5	Bx	1,8	Bx	2,5	Bx
CTC T cmolc/dm <sup>3</sup>	3,29	Bx	3,13	Bx	4,30	Bx	3,33	Bx	5,50	M	4,66	M	4,28	Bx	3,60	Bx
CTC t cmolc/dm <sup>3</sup>	1,89	Bx	1,53	Bx	2,84	M	1,63	Bx	3,60	M	3,06	M	2,48	M	1,70	Bx
V %	57	M	33	Bx	66	B	37	Bx	65	B	46	M	58	M	31	Bx
m %	0	M Bx	33	M	0	M Bx	25	Bx	0	M Bx	29	Bx	0	M Bx	35	M
SB cmolc/dm <sup>3</sup>	1,89	M	1,03	Bx	2,84	M	1,23	Bx	3,60	M	2,16	M	2,48	M	1,10	Bx

**Tabela 2.A - Análises de Solo do experimento de lâminas de irrigação (Artigo 3)**

Identificação 3007	lado A		lado A		lado B		lado B		lado C		lado C		lado D		lado D	
	0-20 cm		20-40 cm		baixada 0-20 cm		baixada 20-40 cm		0-20 cm		20-40 cm		0-20 cm		20-40 cm	
<b>Macronutrientes</b>																
pH água	6,00	B	5,10	Bx	6,34	A	5,57	B	6,40	A	5,18	Bx	6,69	A	4,80	Bx
M.O. dag/kg	2,90	M	2,00	Bx	2,70	M	2,10	M	2,90	M	2,20	M	2,90	M	1,90	Bx
P mg/dm <sup>3</sup>	14,0		0,8		19,8		1,2		10,7		0,5		10,5		0,9	
K mg/dm <sup>3</sup>	32	Bx	22	Bx	26	Bx	26	Bx	42	M	22	Bx	51	M	51	M
Ca cmolc/dm <sup>3</sup>	2,08	M	1,20	Bx	2,54	B	1,24	M	2,44	B	0,88	Bx	2,48	B	1,12	Bx
Mg cmolc/dm <sup>3</sup>	0,80	M	0,54	M	0,10	M Bx	0,87	M	1,06	B	1,56	M B	0,58	M	0,65	M
Al cmolc/dm <sup>3</sup>	0,00	M Bx	1,0	M	0,0	M Bx	0,5	B	0,0	M Bx	0,9	M	0,0	M Bx	1,0	M
H + Al cmolc/dm <sup>3</sup>	1,40	Bx	2,1	Bx	1,6	Bx	2,1	Bx	1,9	Bx	2,5	Bx	1,8	Bx	2,5	Bx
CTC T cmolc/dm <sup>3</sup>	4,36	M	3,90	Bx	4,30	Bx	4,28	Bx	5,50	M	5,00	M	4,99	M	4,40	M
CTC t cmolc/dm <sup>3</sup>	2,96	M	2,80	M	2,71	M	2,68	M	3,60	M	3,40	M	3,19	M	2,90	M
V %	68	B	46	M	63	B	51	M	65	B	50	M	64	B	43	M
m %	0	M Bx	36	M	0	M Bx	19	Bx	0	M Bx	26	Bx	0	M Bx	34	M
SB cmolc/dm <sup>3</sup>	2,96	M	1,80	Bx	2,71	M	2,18	M	3,60	M	2,50	M	3,19	M	1,90	M

**Tabela 3.A - Análises de Solo do experimento de interrupção da irrigação (Artigo 4)**

Identificação 3003	lado A		lado A		lado B		lado B		lado C		lado C		lado D		lado D	
	0-20 cm		20-40 cm		baixada 0-20 cm		baixada 20-40 cm		0-20 cm		20-40 cm		0-20 cm		20-40 cm	
<b>Macronutrientes</b>																
pH água	6,22	A	4,70	Bx	6,24	A	4,48	M Bx	5,92	B	4,63	Bx	6,20	A	4,63	Bx
M.O. dag/kg	1,30	Bx	0,40	M Bx	0,90	Bx	0,30	M Bx	1,10	Bx	0,10	M Bx	0,80	Bx	0,40	M Bx
P mg/dm <sup>3</sup>	0,2		31,9		7,7		35,8		0,9		18,6		2,2		22,3	
K mg/dm <sup>3</sup>		M Bx		M Bx		M Bx		M Bx		M Bx		M Bx		M Bx		M Bx
Ca cmolc/dm <sup>3</sup>	2,55	B	0,83	Bx	1,76	M	0,35	M Bx	1,34	M	0,52	Bx	1,72	M	0,73	Bx
Mg cmolc/dm <sup>3</sup>	1,79	M B	1,37	B	1,17	B	1,20	B	1,15	B	0,86	M	1,38	B	0,69	M
Al cmolc/dm <sup>3</sup>	0,00	M Bx	0,8	M	0,0	M Bx	1,0	M	0,0	M Bx	1,0	M	0,0	M Bx	1,0	M
H + Al cmolc/dm <sup>3</sup>	1,00	M Bx	1,5	Bx	1,0	M Bx	1,6	Bx	1,2	Bx	1,9	Bx	1,2	Bx	2,4	Bx
CTC T cmolc/dm <sup>3</sup>	5,34	M	3,70	Bx	4,30	Bx	3,15	Bx	4,80	M	3,28	Bx	4,30	Bx	3,82	Bx
CTC t cmolc/dm <sup>3</sup>	4,34	M	3,00	M	2,93	M	2,55	M	3,60	M	2,38	M	3,10	M	2,42	M
V %	81	M B	59	M	68	B	49	M	75	B	42	M	72	B	37	Bx
m %	0	M Bx	27	Bx	0	M Bx	39	M	0	M Bx	42	M	0	M Bx	41	M
SB cmolc/dm <sup>3</sup>	4,34	B	2,20	M	2,93	M	1,55	Bx	3,60	M	1,38	Bx	3,10	M	1,42	Bx

Classificação de acordo com as referências da 5ª aproximação: MBx= Muito Baixo; Bx= baixo; M= médio; B= bom; MB= Muito Bom; A= alto; MA= Muito Alto.

Extratores:

P, K e Na: Mehlich 1 x

M.O.: Método Colorimétrico

Ca, Mg, Al: KCl 1 N

M.O.: Método Colorimétrico

Ca, Mg, Al: KCl 1 N