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

**Relações hídricas na fase inicial de desenvolvimento da
cana-de-açúcar submetida a déficit hídrico variável**

Robson Mauri

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação
e Drenagem

**Piracicaba
2012**

Robson Mauri
Engenheiro Agrônomo

**Relações hídricas na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar
submetida a déficit hídrico variável**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

**Piracicaba
2012**

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

Mauri, Robson

Relações hídricas na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar submetida a déficit hídrico variável / Robson Mauri. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2012.
103 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Água - Eficiência 2. Balanço hídrico 3. Cana-de-açúcar 4. Irrigação 5. Raiz
6. Seca - Resistência I. Título

CDD 633.61
M455r

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

Aos meus pais,

João Paulino Mauri e Rita de Cássia C. T. Mauri,

DEDICO

Ao meu afilhado Gabriel,

Aos sobrinhos, Henrique e Ana Clara,

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder a graça da vida e por ser luz em minha caminhada, me permitindo alcançar meus objetivos;

Agradeço infinitamente aos meus pais, João Paulino Mauri e Rita de Cássia C. T. Mauri, pelo exemplo de vida e excepcional participação na minha formação, sempre presente, me apoiando em todos os momentos da minha vida;

Aos meus irmãos e todos os demais familiares, agradeço muito pelo apoio e pelo carinho de cada um de vocês;

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pela sólida formação, a qual permitiu continuidade nos meus estudos;

Aos meus professores de graduação da UFRRJ, Jorge Luiz Pimenta Mello e Leonardo Duarte Batista da Silva, pela valiosa contribuição na minha formação e pelo incentivo e apoio à realização deste curso;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ/USP, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de continuar a minha formação;

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pela confiança, orientação e pelos ensinamentos;

Ao professor Rubens Duarte Coelho, pela oportunidade, confiança, orientação, amizade e pelos ensinamentos que contribuíram valiosamente para a minha formação acadêmica e pessoal;

Às professoras Taciana Villela Savian e Sonia Maria De Stefano Piedade, pela orientação nas análises estatísticas;

A todos os meus colegas e amigos que ajudaram na condução do experimento e na correção do trabalho, especialmente Fernando Barbosa, Daniel Leal, Eusímio Fraga, Everaldo Moreira, Carlos José, Rafael Maschio e Roque Emmanuel;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas. Agradeço a todos pela ajuda e pelo companheirismo durante esse período;

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa

do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI); e

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Irrigação

*Ao semear a safra do amanhã
No cavucar do solo enfileirado,
Não deixa a falta d'água ser vilã
E sepultar teus sonhos no passado*

*A irrigação é a forma campeã
De nosso esforço ser recompensado,
É tecnologia anfitriã
De glória e de sucesso conquistado*

*De forma aérea ou mesmo junto ao chão
Com defensivo ou fertirrigação
É "chuva" que garante o resultado*

*E onde nem havia produção
Hoje há fartura, emprego e evolução
No solo de um Brasil multiplicado!*

Flávio Levy

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1 Revisão bibliográfica	21
2.1.1 A cana-de-açúcar	21
2.1.1.1 Aspectos gerais.....	21
2.1.1.2 Fases fenológicas.....	22
2.1.1.3 Desenvolvimento inicial da cultura	24
2.1.1.4 Estabelecimento do sistema radicular	30
2.1.2 Deficiência hídrica	33
2.1.2.1 Considerações gerais.....	33
2.1.2.2 Déficit hídrico e cana-de-açúcar	34
2.1.2.3 Influência sobre o desenvolvimento do sistema radicular	37
2.1.3 Eficiência no uso da água	38
2.2 Material e Métodos.....	40
2.2.1 Localização e caracterização da área experimental.....	40
2.2.2 Delineamento experimental.....	43
2.2.3 Medidas Meteorológicas.....	44
2.2.4 Correção do solo, plantio e condução da cultura	45
2.2.5 Manejo da irrigação	49
2.2.6 Análise das plantas	51
2.2.6.1 Porcentagem de brotação e emergência.....	51
2.2.6.2 Porcentagem de touceiras vivas.....	52
2.2.6.3 Extensão máxima do colmo primário.....	52
2.2.6.4 Número de perfilhos	52

2.2.6.5 Acúmulo de matéria seca	52
2.2.7 Análise do sistema radicular	53
2.2.7.1 Distribuição do sistema radicular	53
2.2.7.2 Estimativa do particionamento de fotoassimilados	54
2.2.8 Eficiência no uso da água.....	54
2.3 Resultados e Discussão	55
2.3.1 Dados meteorológicos	55
2.3.2 Dados de umidade do solo	57
2.3.3 Respostas biométricas das plantas ao déficit hídrico para diferentes profundidades de solo	61
2.3.3.1 Porcentagem de brotação e emergência	61
2.3.3.2 Porcentagem de touceiras vivas	63
2.3.3.3 Extensão máxima do colmo primário	66
2.3.3.4 Número de perfilhos.....	73
2.3.3.5 Acúmulo de matéria seca da parte aérea	76
2.3.4 Sistema Radicular.....	78
2.3.4.1 Respostas biométricas e morfológicas do sistema radicular ao déficit hídrico para plantas cultivadas em solos com 40 cm de profundidade.....	78
2.3.4.2 Estimativa do particionamento de fotoassimilados	83
2.3.5 Eficiência no uso da água.....	86
3 CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS	91
ANEXOS	99

RESUMO

Relações hídricas na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar submetida a déficit hídrico variável

O setor sucroalcooleiro encontra-se em plena expansão no país, incluindo áreas consideradas marginais, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica. O estabelecimento da cultura no campo é fundamental para o sucesso da atividade agrícola, uma vez que define parte do potencial de produção, sendo que o déficit hídrico nessa fase pode afetar significativamente o *stand* de plantas. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo quantificar os níveis de déficit hídrico que comprometem o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, para diferentes profundidades de solo (níveis de disponibilidade hídrica). O experimento foi conduzido na área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em ambiente protegido (casa de vegetação). O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, textura franco arenosa, denominado Série “Sertãozinho”. Foram utilizadas caixas de cimento amianto com capacidade de 100 litros, preenchidas com diferentes camadas de pedra brita nº 02, e solo, simulando profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm. Os níveis de déficit hídrico foram representados pela evapotranspiração de referência acumulada de 0, 40, 80, 120, 160, 200, 240 e 280 mm, desde o plantio até o retorno da irrigação, estando a umidade inicial do solo na capacidade de campo. O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento e o manejo da irrigação com base em tensiometria. O delineamento experimental em blocos ao acaso (DBC) no esquema fatorial 4 x 8, totalizou 32 tratamentos, sendo a parcela experimental representada por uma caixa contendo, inicialmente, seis gemas de cana-de-açúcar. Observou-se que a umidade do solo na capacidade de campo na ocasião do plantio é suficiente para promover a brotação e emergência das mudas, independente do nível de déficit hídrico imposto posteriormente. Para profundidades de solo de 10 e 20 cm, nível de déficit hídrico de 160 mm de ET_{0ac} provocou a morte total das plantas, enquanto que para profundidades de 30 e 40 cm, isto ocorreu com nível de 200 mm de ET_{0ac} . Nível de déficit hídrico de 40 mm de ET_{0ac} já é suficiente para reduzir, de forma significativa, o desenvolvimento da planta, independente da profundidade de solo. Entretanto, em condições desfavoráveis de plantio (a 10 e a 20 cm), o efeito negativo do déficit hídrico sobre o desenvolvimento da planta é ainda maior. Além deste efeito, a imposição do déficit hídrico também causou mudança no padrão de crescimento da planta, sendo expresso pela maior relação raiz - parte aérea. A eficiência no uso da água na fase inicial da cultura foi reduzida significativamente com o déficit hídrico e a redução da profundidade do solo explorada pelo sistema radicular, apresentando valores entre 0,16 e 3,21 g L⁻¹.

Palavras-chave: Tolerância à seca; Eficiência no uso da água; Raiz; Irrigação

ABSTRACT

Water relations in the initial development phase of sugar cane under variable water deficit

Sugar and ethanol industry is booming in Brazil, including marginal areas, especially those related to water availability. The establishment of the crop in the field is fundamental to the success of this intensive agriculture, since it defines the baseline of the potential production. Water deficit at this stage can significantly affect plant stand. This study aimed to quantify water deficit levels that undertake the initial development of cane sugar, for different soil depths (levels of water availability). The experiment was conducted in the research area of the Biosystems Engineering Department at the School of Agriculture "Luiz de Queiroz" (ESALQ / USP) under greenhouse conditions. The soil was classified as Red-Yellow Latosol, sandy loam, called "Sertãozinho Series". It was used cement boxes with a capacity of 100 liters, filled with different layers of nº 02 gravel, and soil, simulating porous media depths of 10, 20, 30 and 40 cm. The levels of water deficit were represented by the reference evapotranspiration accumulated (ET_{0ac}) of 0, 40, 80, 120, 160, 200, 240 and 280 mm from planting until the return of irrigation, with the initial soil moisture at field capacity. Drip irrigation system and tensiometers were used to control soil moisture. The experiment was carried out under randomized block design (RBD) in a factorial scheme of 4 x 8, totalizing 32 treatments, being the experimental unit represented by a box containing six gems of sugar cane initially. Maintaining soil moisture at field capacity at planting time is sufficient to promote sprouting and emergence of seedlings, regardless of water deficit level following. For soil depths of 10 and 20 cm, water deficit level of 160 mm ET_{0ac} caused total death of the plants, while soil depths between 30 and 40 cm, this occurred with a higher level of 200 mm ET_{0ac} . Water deficit level of 40 mm ET_{0ac} is enough to reduce significantly the aerial development of sugar cane plants, regardless of soil depth. However, under unfavorable planting conditions (10 and 20 cm soil preparation), the negative effect of drought on plant development is pronounced. In addition to this effect, the imposition of water deficit also caused changes in the plant growth rate that was expressed by a higher relationship root - aboveground biomass. Water use efficiency in the initial phase of sugar cane crop was significantly reduced with water deficit and the reduction of soil depth explored by the root system, with values ranging from 0,16 to 3,21 g dry mass L^{-1} of water.

Keywords: Drought tolerance; Water use efficiency; Root; Irrigation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases fenológicas da cana-de-açúcar. Adaptado de Gascho e Shih (1983 apud CÂMARA, 1993).....	23
Figura 2 - Sistema radicular de uma planta jovem de cana-de-açúcar, mostrando as raízes emergentes na base do tolete e as raízes emergentes a partir da base do perfilho (BLACKBURN, 1984 apud SMITH et al., 2005).....	31
Figura 3 - Sistema radicular de uma planta estabelecida, mostrando três tipos de raízes funcionais: superficiais, de fixação e raízes-cordão (BLACKBURN, 1984 apud BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007).	32
Figura 4 - Vista geral da área experimental.....	41
Figura 5 - Esquema de montagem das caixas para os tratamentos de profundidade do solo.	42
Figura 6 - Croqui de distribuição dos tratamentos na área experimental.	47
Figura 7 - Lavoura onde foram retiradas as mudas (A); Facão utilizado para seccionamento dos toletes (B); Detalhe da parte apical e basal do colmo descartadas (C); Posicionamento do tolete na caixa (D); Detalhe do posicionamento das gemas para as laterais (E); Cobrição dos toletes com solo e detalhe da montagem do sistema de irrigação nas caixas (F).....	48
Figura 8 - Profundidade de instalação e posicionamento dos tensiômetros na caixa (A); Leitura do potencial mátrico com tensímetro digital (B).	49
Figura 9 - Comportamento diário das variáveis meteorológicas; temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmín), temperatura média (Tmed), umidade relativa máxima (URmax), umidade relativa mínima (URmin), umidade relativa média (URmed), radiação solar (Rs) e evapotranspiração de referência estimada (ET0).....	56
Figura 10 - Valores mínimos de umidade do solo alcançados em função do déficit hídrico nas diferentes profundidades de solo.....	58
Figura 11 - Valores mínimos de umidade do solo alcançados em função da profundidade nos diferentes níveis de déficit hídrico.	60
Figura 12 - Desenvolvimento das plantas aos 14 DAP em solos com profundidade de 10 cm, irrigado (A) e não irrigado (B) e em solos com 40 cm de profundidade, irrigado (C) e não irrigado (D).	62
Figura 13 - Porcentagem de touceiras vivas para cada profundidade de solo em função do déficit hídrico.....	64

- Figura 14 - Extensão máxima do colmo primário em função do nível de déficit hídrico para diferentes profundidades de solo. 69
- Figura 15 - Desenvolvimento das plantas submetidas a diferentes níveis de déficit hídrico (da esquerda para a direita N0, N40, N80, N120, N160 e N200) cultivadas em solos com profundidade de 10 cm (A), 20 cm (B), 30 cm (C) e 40 cm (D), aos 90 DAP..... 71
- Figura 16 - Desenvolvimento das plantas cultivadas em diferentes profundidades de solo (da esquerda para a direita P10, P20, P30 e P40) sem déficit hídrico (A) e submetidas a níveis de 40 mm (B), 80 mm (C), 120 mm (D), 160 mm (E) e 200 mm (F) de ET_{0ac} , aos 90 DAP. 73
- Figura 17 - Número de perfilhos da cana-de-açúcar em função do nível de déficit hídrico e da profundidade de solo na fase inicial de desenvolvimento..... 75
- Figura 18 - Desenvolvimento das plantas do tratamento P40 para os níveis de déficit de N0, N80 e N160, respectivamente, utilizadas para visualização do sistema radicular..... 80
- Figura 19 - Distribuição do sistema radicular para plantas sem restrição hídrica aos 90 DAP. 80
- Figura 20 - Distribuição do sistema radicular e redução de matéria seca das raízes para plantas com restrição hídrica de 80 mm de ET_{0ac} aos 90 DAP..... 81
- Figura 21 - Distribuição do sistema radicular e redução de matéria seca das raízes para plantas com restrição hídrica de 160 mm de ET_{0ac} aos 90 DAP..... 81
- Figura 22 - Variação da água disponível (AD) nas diferentes camadas de solo (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40cm) para o tratamento P40 e N200, no período de 08/20/2011 a 01/03/2011..... 82
- Figura 23 - Valores médios de matéria seca da parte aérea e valores médios estimados de matéria seca do sistema radicular para uma unidade experimental (caixa 100 L), em função de diferentes níveis de déficit hídrico. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%, para o mesmo parâmetro analisado. 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do solo	41
Tabela 2 - Caracterização físico-hídrica do solo	41
Tabela 3 - Dose equivalente de nutrientes aplicados em kg ha ⁻¹	45
Tabela 4 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980).....	50
Tabela 5 - Retorno da irrigação em função da ET ₀ acumulada	55
Tabela 6 - Umidade volumétrica do solo (cm ³ cm ⁻³) para as diferentes profundidades antes do retorno da irrigação de cada tratamento de déficit hídrico.....	57
Tabela 7 - Resumo da análise de variância referente à brotação e à emergência dos perfilhos aos 60 DAP submetidos a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)	61
Tabela 8 - Análise de médias da brotação e da emergência dos perfilhos aos 60 DAP para os diferentes níveis de déficit hídrico	61
Tabela 9 - Análise de médias da brotação e da emergência dos perfilhos aos 60 DAP para as diferentes profundidades de solo	63
Tabela 10 - Estimativa da porcentagem de touceiras vivas para as profundidades P10 e P20 (CAD de 12,11 e 24,92mm) em função do déficit hídrico (ET ₀ ac)...	64
Tabela 11 - Estimativa da porcentagem de touceiras vivas para as profundidades P30 e P40 (CAD de 37,73 e 48,61mm) em função do déficit hídrico (ET ₀ ac)...	64
Tabela 12 - Resumo da análise de variância referente à extensão máxima do colmo primário das plantas submetidas a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)	66
Tabela 13 - Análise de médias da extensão máxima do colmo primário aos 30 DAP em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo	67
Tabela 14 - Análise de médias da extensão máxima do colmo primário aos 60 DAP em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo	67
Tabela 15 - Análise de médias da extensão máxima do colmo primário aos 90 DAP em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo	67

Tabela 16 - Resumo da análise de variância referente ao número de perfilhos das plantas submetidas a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)	73
Tabela 17 - Análise de médias do número de perfilhos das plantas em função do nível de déficit hídrico	74
Tabela 18 - Análise de médias do número de perfilhos das plantas em função da profundidade do solo	74
Tabela 19 - Resumo da análise de variância referente ao acúmulo de matéria seca do colmo primário (Colmo) e ao colmo primário + perfilhos (Touceira) submetidos a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)	76
Tabela 20 - Análise de médias referente ao acúmulo de matéria seca do colmo principal em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo, aos 90 DAP	76
Tabela 21 - Análise de médias referente ao acúmulo de matéria seca da touceira (colmo primário + perfilhos) em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo, aos 90 DAP	76
Tabela 22 - Resumo da análise de variância referente ao sistema radicular das plantas submetidas a três níveis de déficit hídrico (Déficit) para uma profundidade de solo de 40 cm	78
Tabela 23 - Análise de médias da matéria seca do sistema radicular das plantas em função do nível de déficit hídrico (g raiz/0,79 dm ³ de solo)	79
Tabela 24 - Resumo da análise de variância referente à estimativa da matéria seca das raízes, à matéria seca da parte aérea (PA) e à estimativa da relação raiz - parte aérea das plantas submetidas a três níveis de déficit hídrico (Déficit) para uma profundidade de solo de 40 cm	83
Tabela 25 - Análise de médias da estimativa da relação raiz - parte aérea das plantas em função do nível de déficit hídrico	83
Tabela 26 - Resumo da análise de variância referente à eficiência no uso da água aos 90 DAP, para plantas submetidas a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)	86
Tabela 27 - Análise de médias referente à eficiência no uso da água aos 90 DAP, em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo (g L ⁻¹)	86

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área plantada estimada em 8.442,8 mil hectares, distribuídos nos Estados de São Paulo (52,8%), Minas Gerais (8,77%), Goiás (7,97%), Paraná (7,33%), Mato Grosso do Sul (5,69%), Alagoas (5,34%), Pernambuco (3,84%) e demais estados (8,26%), com previsão de produção de 641.982 mil toneladas para a safra 2011/2012 (CONAB, 2011). O setor sucroenergético brasileiro é um dos trunfos que o país possui nas negociações internacionais, gerando divisas, prestígio e admiração dos países desenvolvidos.

O país desponta como líder mundial nas exportações de açúcar, e na utilização do etanol como fonte de energia renovável, principalmente pela crescente participação dos veículos bicomcombustíveis na frota automotiva brasileira (COSTA, 2009). Além da produção de açúcar e álcool, surgem novos usos para a cana-de-açúcar, como matéria-prima para co-geração de energia, produção de bioplástico, diesel, querosene de aviação e até cosméticos. Há notadamente uma expansão da lavoura canavieira no Brasil, sobretudo nos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais. Entretanto, muitas vezes essa expansão se dá em áreas menos favoráveis ao desenvolvimento da cultura, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica.

A disponibilidade hídrica restritiva no solo afeta negativamente o crescimento dos cultivos agrícolas e é a principal causa da redução da produtividade (PIMENTEL, 2004), sendo que para cana-de-açúcar o início do desenvolvimento da cana-planta é o período mais sensível ao déficit hídrico (ROSENFELD, 1989). Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar é de 1500 a 2500 mm por ciclo vegetativo e o manejo da irrigação deve ser feito de acordo com as fases fenológicas de cada variedade.

A irrigação é uma prática importante para o aumento da produtividade da cultura, pois apesar do elevado nível tecnológico aplicado pelos produtores, tais como adequada aplicação de nutrientes, manejo fitossanitário, controle de plantas daninhas, uso de variedades melhoradas, entre outros, a produtividade da cana-de-açúcar se manteve constante nos anos de 1990 a 2005 (DALRI, 2006), e de acordo com dados

apresentados pela FNP (2011), esses valores não sofreram aumento significativo nos últimos cinco anos.

Além do aumento de produtividade agrícola e longevidade das soqueiras, a irrigação também apresenta outros benefícios, denominados por Mاتيoli (1998) benefícios indiretos, relacionados com a redução de custos no processo produtivo agrícola, proporcionados pelo aumento de produtividade, tais como: dispensa de arrendamentos, dispensa do plantio e tratos culturais das áreas que seriam arrendadas, dispensa com transporte, se os arrendamentos dispensados forem mais distantes da unidade industrial que a área irrigada.

O manejo da irrigação deve ser feito de forma a permitir que a cultura expresse seu potencial genético de produção, ou seja, sem deixar que ocorra déficit hídrico. Entretanto, o custo da irrigação plena para cana-de-açúcar é elevado e, em alguns casos, torna-se inviável economicamente, conforme é discutido por Marques et al. (2006) e apresentado pela FNP (2011), onde a “*irrigação de salvação*”, que se resume a aplicação de apenas uma parte da lâmina total necessária, pode ser favorável. Dessa forma, é imperioso que as buscas por informações sobre cana irrigada sejam direcionadas aos estudos do comportamento da cultura quando sujeita à deficiência hídrica.

Em linhas gerais, vários autores mencionam a redução da produtividade da cana-de-açúcar quando o fornecimento de água é limitado. Entretanto, pouco se sabe sobre o quanto de água pode ser restringido para a cultura sem afetar o seu desenvolvimento, sobretudo na fase inicial. Informações como estas são importantes, pois possibilitam a recomendação das épocas ideais de plantio da cana-de-açúcar em função da distribuição das chuvas, bem como permitem a recomendação de uma eventual “*irrigação de salvação*” em períodos de veranicos, sem afetar significativamente o estabelecimento inicial da cultura, e consequentemente, a produção final.

Fundamentando-se na hipótese de que um determinado nível de déficit hídrico não causa danos significativos no desenvolvimento inicial da cultura da cana-de-açúcar, o presente trabalho teve por objetivo quantificar esse nível de déficit para diferentes profundidades de solos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 A cana-de-açúcar

2.1.1.1 Aspectos gerais

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, que abrange várias espécies, entretanto, na sua maioria, as canas atualmente cultivadas são híbridas. Tradicionalmente é cultivada desde a latitude 35 °N a 35 °S, com uma larga escala de adaptação e vem enfrentando grandes desafios tecnológicos, em virtude da expansão de sua área de cultivo para atender aos programas de energia renovável no Brasil. A produção de biomassa gerada pela cultura também vem despertando interesse econômico, apresentando potencial energético complementar ao país, podendo ser utilizadas para a co-geração de energia elétrica (bioeletricidade) e, num contexto de futuro próximo, na produção de etanol de segunda geração (MASCHIO, 2011).

A cultura sofre influência das variáveis climáticas ao longo de todo o ciclo vegetativo, sendo que os principais fatores que determinam o sucesso da cultura e a sua exploração econômica são a temperatura ambiente e a precipitação pluvial (BRUNINI, 2010). O ciclo fenológico da cana-de-açúcar completa-se em aproximadamente 11 a 22 meses e necessita de um período quente e úmido para brotar, emergir, perfilhar e outro relativamente seco e/ou frio, para acumular sacarose (maturação).

Uma forma de aumentar a produtividade em função do déficit hídrico é a utilização da irrigação, cujo objetivo principal é suprir as necessidades hídricas da cultura. Entretanto, essa técnica não funciona isoladamente, mas, sim, conjugada com outras práticas de manejo da cultura. A irrigação, além de proporcionar incremento na produtividade das culturas, permite ampliar o tempo de exploração da planta e o número de colheitas (DALRI; CRUZ, 2008).

O potencial da produtividade média da cultura pode ser medido através dos ambientes de produção, definido por Prado (2011) como o conjunto das interações das condições físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas de superfície e subsuperfície dos solos com as condições climáticas (pluviometria, temperatura, radiação solar e evaporação).

Os componentes do ambiente de produção são representados pela fertilidade, como fonte de nutrientes para as plantas, pela profundidade do solo, que representa o espaço físico onde as raízes crescem e tem relação direta com a disponibilidade de água, pela textura, relacionada com os níveis de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions e disponibilidade hídrica e pela água, como parte da solução do solo, que é vital para a sobrevivência das plantas (PRADO, 2008).

De acordo com Prado et al. (2010), a água ocupa a posição de maior destaque num ambiente de produção, uma vez que quando limitante, mesmo em solos com boa fertilidade, reduz significativamente a produtividade da cana-de-açúcar e quando adequada, desloca o ambiente de produção favoravelmente até mesmo nos solos com baixo potencial químico. Prado (2011) menciona que a irrigação reduz ou anula a deficiência hídrica anual, aumentando a produtividade e a longevidade da planta.

Segundo Pires et al. (2010), o aumento expressivo da área plantada vai demandar maior uso da irrigação, tanto para a aplicação de vinhaça, quanto para atender à demanda evaporativa das novas áreas. Outra situação em que o uso da irrigação traz grandes benefícios é logo após o corte, no período de abril a agosto. Essa prática, denominada de “*irrigação de salvação*”, consiste na aplicação de uma lâmina mínima para garantir boa brotação da socaria (SOARES; CARDOSO, 2007), favorecendo o desenvolvimento inicial da cultura até a chegada das chuvas.

2.1.1.2 Fases fenológicas

Lucchesi (1987) relata a definição de fenologia como sendo o estudo dos fenômenos periódicos da vida de uma planta em relação às condições ambientais. As fases compreendem o aparecimento, transformação ou desaparecimento rápido de órgão da planta, sendo algumas facilmente observadas e outras não. O conhecimento

da fenologia permite caracterizar períodos críticos da cultura, pois existem momentos ao longo do ciclo em que as influências do meio são mais intensas, permitindo assim, evitar ou reduzir os danos causados às plantas e à produção.

Para a cultura da cana-de-açúcar, de acordo com Gascho e Shih (1983 apud CÂMARA, 1993), é possível considerar quatro fases fenológicas: brotação e emergência; perfilhamento e estabelecimento da cultura; crescimento dos colmos; e maturação dos colmos (Figura 1).

Figura 1 - Fases fenológicas da cana-de-açúcar. Adaptado de Gascho e Shih (1983 apud CÂMARA, 1993)

De acordo com a divisão de Gascho e Shih (1983 apud CÂMARA, 1993) e o detalhamento de Segato et al. (2006), as fases podem ser caracterizadas da seguinte maneira:

Brotação e emergência: ocorrendo condições ambientais favoráveis, principalmente temperatura e umidade, iniciam-se as atividades meristemáticas resultando no desenvolvimento das raízes do tolete e a emergência de um pequeno broto na superfície do solo, que ocorre geralmente após 20 a 30 dias do plantio.

Perfilhamento e estabelecimento da cultura: na sequência, as gemas localizadas na base do colmo primário se intumescem, observando novos brotos, aproximadamente 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário. À medida que os

colmos desenvolvem-se, novas raízes vão sendo formadas a partir de suas bases e o sistema radicular da touceira vai aumentando. Em função da concorrência pelos fatores limitantes do meio, sobretudo luminosidade, cessa-se esta fase e os colmos mais jovens chegam inclusive a morrer.

Crescimento dos colmos: os perfilhos sobreviventes prosseguem seu crescimento e desenvolvimento, ganhando altura e iniciando o acúmulo de açúcares da base em direção ao ápice da planta. Durante essa fase, as folhas mais velhas começam a ficar amareladas e secam. Nesta fase, o sistema radicular encontra-se bem desenvolvido, tanto nas laterais quanto em profundidade. A maior parte das raízes está nos primeiros 40 centímetros de profundidade, sendo esta a zona principal de absorção de água e nutrientes por parte da cultura. O canavial pode atingir altura acima de três metros, com a população final de colmos, variando em função das condições de clima e solo.

Maturação dos colmos: a maturação inicia-se junto com o crescimento intenso dos colmos sobreviventes do perfilhamento das touceiras. À medida que vão amadurecendo, os colmos continuam o seu crescimento e desenvolvimento, acumulando cada vez mais sacarose em seus internódios. Quando as touceiras atingem altura igual ou superior a dois metros, nota-se o amarelecimento e a consequente seca das folhas que se encontram na altura mediana da planta, indicando que já está sendo depositado açúcar nessa região. Ao atingir o seu tamanho final, constituem-se colmos industrializáveis, passando a acumular mais intensamente a sacarose produzida pela fotossíntese. Nesta fase da cultura, 11 a 20 meses após o plantio (conforme época de plantio e variedade), observa-se plena maturação dos colmos.

2.1.1.3 Desenvolvimento inicial da cultura

A formação de canaviais geralmente é feita por intermédio de pedaços de colmo, podendo conter uma ou mais gemas. A brotação das gemas na cana-de-açúcar é um dos processos que requerem maior atenção nesta cultura, pois dela dependerá, em grande medida, a futura população de plantas no campo (PLANA et al., 1987).

Após a cobertura do tolete com solo, havendo disponibilidade hídrica, inicia-se o processo de ativação das enzimas e hormônios que controlam a divisão e o crescimento celular, tanto da gema como dos pontos dos primórdios das raízes na zona radicular (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2010).

Assim como a germinação das sementes, a brotação é um processo biológico que consome energia, que, neste caso, é originária da degradação de substâncias de reserva do tolete, através do processo de respiração (SEGATO et al., 2006)

Em linhas gerais, Casagrande e Vasconcelos (2010) ordenam o processo de degradação das reservas dos toletes em três fases: *Fase (1)* - Rápida com acentuado aumento da atividade respiratória, grande quantidade de energia produzida e início da degradação das substâncias de reservas; *Fase (2)* - Transporte ativo de substâncias de reserva (simplificadas) para os pontos de crescimento; *Fase (3)* - Substâncias transformadas da Fase 2 são reorganizadas em substâncias complexas para formar o citoplasma, protoplasma e parede celular, tornando visível o crescimento do rebento e primórdios radiculares.

O tolete, sendo um fragmento de colmo maduro, contém feixes vasculares (floema e xilema), que promovem a ligação entre o broto e as raízes em desenvolvimento, que atuam como drenos fisiológicos (SEGATO et al., 2006).

Aproximadamente num período de 60 dias, essas reservas são fundamentais para a evolução do processo de brotação, reduzindo gradativamente a relação de dependência com o desenvolvimento do sistema radicular, que passa a absorver água e nutrientes (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2010).

De acordo com Simões Neto (1986), no processo de brotação, é necessário conhecer também os fenômenos que interferem no mesmo e qual é a influência destes no desenvolvimento da planta.

Entre os fatores que influenciam o processo de brotação, Casagrande e Vasconcelos (2010) citam os relacionados ao ambiente, os fatores genéticos e fisiológicos e ainda, os fatores fitotécnicos. De acordo com os autores, eles são inter-relacionados e podem atuar complementarmente.

Para Segato et al. (2006), entre os fatores ambientais, a temperatura e a umidade são variáveis críticas. A temperatura interfere na velocidade das reações

bioquímicas e na ação de enzimas envolvidas na divisão, diferenciação e crescimento celular, sendo um dos fatores que mais influem na brotação (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2010).

Whiteman et al. (1963) estudando os efeitos da temperatura, luz e água na brotação e no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, enfatizaram que a temperatura ideal está em torno de 30 °C, com depressão severa do crescimento abaixo de 22 °C e praticamente nenhum crescimento na faixa de 10-16 °C.

A água tem papel fundamental nos processos bioquímicos que ativam a brotação. A deficiência hídrica no solo pode prejudicar ou impedir a brotação das gemas, e isso depende da intensidade e da duração do período de deficiência (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2010).

Inman-Bamber e Smith (2005) mencionam que a brotação é altamente dependente do conteúdo de água no solo. Em excesso, pode levar a condições de anaerobiose, afetando a degradação das reservas do tolete, enquanto teores muito baixos limitam o desenvolvimento do sistema radicular, afetando a absorção de água.

A brotação das gemas e raízes e posterior crescimento são melhores quando o potencial hídrico do solo (ψ_s) está próximo a zero, sendo reduzido significativamente quando $\psi_s = -500$ kPa e mínima quando $\psi_s = -2000$ a -3000 kPa (SINGH; SRIVASTAVA, 1974 apud INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Beauclair e Scarpari (2007) mencionam que para obter uma boa brotação e fornecimento de água para a planta, o solo deve estar o mais próximo da capacidade de campo. Segundo os autores o uso da vinhaça e da irrigação aumenta as possibilidades de expansão das épocas de plantio em diversas regiões, e ainda, a utilização da torta de filtro e de outras fontes de matéria orgânica também auxiliam o armazenamento de água no solo, permitindo melhores condições de brotação em épocas desfavoráveis.

Para Casagrande e Vasconcelos (2010), mesmo o plantio realizado em períodos com boa disponibilidade hídrica, é comum a ocorrência de períodos de veranicos, que podem retardar ou reduzir a brotação. Caso esses períodos sejam curtos, as reservas dos toletes podem proporcionar a manutenção e a sobrevivência das gemas e dos brotos recém-emitados, retomando o crescimento após o retorno das chuvas. Entretanto, os autores mencionam que se o veranico for prolongado, poderá ocorrer

morte de gemas e brotos, resultando em falhas na brotação, e conseqüentemente, alterando o *stand* final de plantas.

Segundo Casagrande (1991), mesmo havendo condições ambientais idênticas, a brotação pode ser diferente entre as variedades de cana-de-açúcar. A boa capacidade de brotação é uma característica desejável nas variedades, principalmente quando essa fase envolve épocas com condições ambientais desfavoráveis. Para Lucchesi (2008), existem cultivares cuja emergência é rápida, em outros, mais tardia, alguns em que as gemas brotam antes das raízes, em outros o contrário, características essas de ordem genética, que poderiam também sofrer influências das condições edafo-climáticas.

Silva et al. (2004), avaliaram a brotação, em casa de vegetação, das variedades RB855156 e IAC91-2218 em função do tipo de solo, da cobertura do plantio e da idade das gemas. Os autores observaram que, mesmo utilizando-se de condições de plantio e ambiente idênticas, a primeira variedade apresentou menor brotação em relação à segunda.

Segato et al. (2006) citam que a capacidade de brotação, enraizamento e emergência da cana-de-açúcar é uma característica genética, no entanto, dentro da mesma variedade, a brotação varia de acordo com a idade da muda, diferença de idade da gema, concentração de açúcares e nutrientes minerais.

Os teores de glicose, de umidade e de minerais diminuem do ápice para a base dos colmos, enquanto que o teor de sacarose diminui em sentido contrário, isto é, aumenta do ápice para a base dos colmos (BOVI, 1982). Segundo o autor, é possível notar que a velocidade de emergência das gemas está positivamente correlacionada com os teores de glicose, de umidade e de minerais e negativamente correlacionada com o teor de sacarose existente nos colmos de cana-de-açúcar. Portanto, num mesmo colmo, existe um gradiente de brotação por causa da diferença da idade entre as gemas que vão do ápice para a base.

O plantio, preferencialmente, deve ser realizado com colmos de idade não superior a 12 meses. Colmos velhos possuem menor quantidade de glicose e sais minerais, as escamas de proteção da gema são mais lignificadas e salientes, resultando em menor brotação em relação aos colmos novos (SEGATO et al., 2006).

Simões Neto (1986), estudando o efeito da quantidade de reserva do tolete sobre o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, observou efeito direto dos níveis de reserva energética sobre o crescimento do broto primário. Para Casagrande (1991), quanto mais bem nutridos estiverem os toletes, melhor será a brotação.

Lucchesi (2008) ressalta a importância da dominância apical sobre a brotação das gemas. De acordo com o autor, a auxina é produzida em grandes quantidades na gema apical, possuindo um transporte polar e basípeto no caule, isto é, do ápice para a base. Neste sentido, a dominância apical induz primeiramente o desenvolvimento das gemas localizadas na região superior do colmo e mais tardiamente as localizadas na base.

Segundo Casagrande (1991), a presença de palha exerce efeito desfavorável à velocidade de brotação das gemas, funcionando como obstáculo mecânico ao contato da gema com a umidade do solo, e como isolante à condutividade térmica do solo para a gema.

Os fatores fitotécnicos referem-se às práticas agrícolas e podem interferir positiva ou negativamente na porcentagem e na velocidade da brotação, uma vez que o efeito de todas essas práticas pode favorecer ou desfavorecer os processos fisiológicos durante a fase inicial (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2010).

Uma forma de reduzir os efeitos da dominância apical é o seccionamento dos colmos por volta do plantio. Beauclair e Scarpari (2007) citam que esta prática é realizada visando garantir uma boa porcentagem de brotação, uma vez que toletes com maior número de gemas têm porcentagem de brotação diminuída em decorrência da dominância apical. Assim que ocorre a brotação, esta induz a formação de auxina, fazendo com que as demais gemas não brotem ou o façam com atraso, o que resulta numa menor porcentagem de brotação, quando comparada com o uso de toletes com menor número de gemas.

Em linhas gerais, os estudos relacionados com cana inteira e picada mencionam que a dominância apical é maior em colmos maduros, devendo verificar a idade das mudas. Caso estas sejam novas, até 10 meses, não há necessidade de seccionar (CASAGRANDE, 1991).

Segovia (1974), utilizando a variedade PR-980, estudou o efeito do tamanho das mudas e a posição de plantio da gema sobre a brotação e emergência. Utilizou-se de mudas com uma gema com todo o entrenó superior e inferior, uma gema com meio entrenó superior e uma gema sem entrenós. Todos os tratamentos foram colocados cada um em três posições, gema para cima, para baixo e para os lados. Também foram utilizadas mudas com duas gemas preparadas de acordo com o mesmo esquema utilizado anteriormente, e colocadas em duas posições, devido à filotaxia, ficando gemas para cima e para baixo, e gemas para os lados. Concluiu-se que tanto o tamanho do tolete como a posição na qual ficam as gemas têm uma influência marcante sobre a brotação, que as gemas voltadas para cima e para os lados, nos toletes de maior tamanho, tiveram melhores resultados.

Clements (1940 apud Casagrande, 1991) evidencia a diferença de brotação devida às diversas posições em que a gema é colocada no solo, no momento do plantio. Quando foram plantadas nas posições para cima, para o lado e para baixo, o tempo médio de brotação das gemas (novas, velhas e intermediárias) foi de 10, 18,9 e 24,5 dias, respectivamente.

Com relação à profundidade de plantio, Brieger e Paranhos (1964) citam que esta não deve ser maior do que a da aração, para não correr o risco de plantar em solo não arado, compactado, que dificultaria o desenvolvimento e a penetração do sistema radicular. De acordo com os autores, geralmente a profundidade de plantio oscila entre 25 e 30 cm.

Em condições de umidade do solo favoráveis, a brotação geralmente é boa, independente da profundidade. Entretanto, em condições desfavoráveis, o sulco mais profundo proporcionaria ao tolete melhores condições de umidade (CASAGRANDE, 1991).

Outro fator importante está relacionado à espessura da camada de solo sobre o tolete. Christoffoleti (1986) cita que, no Havaí, toletes cobertos com uma camada de terra de 2,5, 5,0 e 7,5 cm proporcionaram brotações de 96%, 93% e 51%, respectivamente.

O trabalho desenvolvido por Silva et al. (2004) avaliou três camadas de cobertura com solo, simulando as profundidades de plantio de 3, 6 e 12 cm. As melhores brotações ocorreram quando os toletes foram cobertos com 3 e 6 cm.

Para melhor brotação, a cobertura com terra não pode ser excessiva quando as condições de plantio são favoráveis, e uma boa compressão da terra sobre a muda melhora o contato da gema com a umidade do solo e a condutividade térmica solo-gema (CASAGRANDE; VASCONCELOS, 2010).

2.1.1.4 Estabelecimento do sistema radicular

Vasconcelos e Casagrande (2010) mencionam que logo após o plantio da muda, havendo condições favoráveis, inicia-se o desenvolvimento do sistema radicular, com as raízes originárias a partir dos primórdios radiculares situados na zona radicular dos colmos plantados, tendo a função de suprir os perfilhos recém-brotados com água e nutrientes do solo, juntamente com as reservas do tolete.

Após um período variável com as condições locais, cerca de 30 a 45 dias, os primeiros perfilhos começam a emitir suas próprias raízes, a partir das zonas radiculares presentes nos seus próprios internódios (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007).

À medida que estas raízes vão se desenvolvendo, as raízes primárias vão perdendo sua função, a cana planta passa a depender exclusivamente das raízes dos perfilhos. Dependendo das condições climáticas e do solo, em torno de 90 dias após o plantio, todo o sistema radicular encontra-se distribuído nos primeiros 30 cm do solo (CASAGRANDE, 1991).

As raízes do tolete, finas e fibrosas, metabolizam até que as do colmo se desenvolvam e após, morrem. As raízes dos perfilhos são mais grossas, possui a coifa bem desenvolvida e penetram bem no solo (LUCCHESI, 2008). Os dois tipos de raízes são ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Sistema radicular de uma planta jovem de cana-de-açúcar, mostrando as raízes emergentes na base do tolete e as raízes emergentes a partir da base do perfilho (BLACKBURN, 1984 apud SMITH et al., 2005)

Cada perfilho comporta-se como uma planta independente e, portanto, cada um possui um sistema radicular próprio, podendo eventualmente trocar alguns nutrientes e água, pois continuam tendo ligações entre si. Assim, à medida que aumenta o perfilhamento, aumenta o volume de raízes explorando o solo até um ponto de estabilização, quando simplesmente ocorrem renovações das raízes velhas (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007). Com a idade de três meses, as raízes primárias correspondem a menos de 2% da matéria seca da raiz (Van DILLEWIJN, 1952 apud SMITH et al, 2005).

As raízes que têm origem na base dos perfilhos raramente se ramificam durante o início do desenvolvimento, sendo mais comum a ramificação quando o crescimento

em alongamento é completado. As radicelas são densamente cobertas de pelos absorventes, conferindo-lhes uma maior superfície de absorção (CASAGRANDE, 1991).

Em linhas gerais, Beauclair e Scarpari (2007) citam que o sistema radicular da cana-de-açúcar é bem distribuído ao longo do perfil do solo, mas com raízes de diferentes tipos (Figura 3).

Figura 3 - Sistema radicular de uma planta estabelecida, mostrando três tipos de raízes funcionais: superficiais, de fixação e raízes-cordão (BLACKBURN, 1984 apud BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007)

As primeiras são as raízes superficiais, localizadas nos primeiros 30 a 40 cm do perfil do solo, são bem ramificadas e extremamente absorventes. Outro tipo são as raízes de fixação, que atingem profundidades maiores, ultrapassando facilmente 50 cm, entretanto, ao contrário do que sugere o nome, a função dessas não se restringe exclusivamente à fixação, pois podem perfeitamente absorver água e nutrientes, apesar de fazê-lo com menor eficiência do que as raízes superficiais. O terceiro tipo são as raízes-cordão, formadas a partir de aglomerações de raízes verticais. Atingem

profundidades superiores a 5 m no perfil do solo, fornecendo acesso a reservas profundas de água no solo, em períodos de grande estiagem.

As raízes-cordão podem crescer tanto no período de estabelecimento da cultura como em soqueiras. Geralmente ocorrem em períodos de elevado desenvolvimento ou de restabelecimento do sistema radicular, principalmente após o final de períodos de estresse hídrico, com a retomada das chuvas e o aumento da temperatura do solo, que proporcionam condições para o crescimento rápido e vigoroso das raízes (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2010).

2.1.2 Deficiência hídrica

2.1.2.1 Considerações gerais

As plantas estão sujeitas a grande variedade de estresses ambientais, incluindo temperaturas inadequadas, condições físico-químicas de solo desfavoráveis e várias doenças e pragas; contudo, pode-se dizer que o déficit hídrico reduz o crescimento e a produtividade vegetal, mais que todos os outros estresses combinados, pois ocorre em qualquer local, mesmo nas regiões consideradas úmidas (KRAMER, 1983). Para Taiz e Zeiger (2002), o déficit hídrico não é limitado apenas às regiões áridas e semiáridas, pois mesmo em regiões consideradas climaticamente úmidas, ocorrem períodos em que a distribuição irregular das chuvas limita o crescimento das plantas.

Nesta mesma ideia, Santos e Carlesso (1998) citam que a frequência e a intensidade do déficit hídrico constituem os fatores mais importantes à limitação da produção agrícola mundial. De acordo com Ortolani e Camargo (1987), sem se considerar os efeitos extremos, esta limitação é responsável por 60 a 70% da variabilidade final da produção.

Em condições adversas à disponibilidade hídrica, Taiz e Zeiger (2004) mencionam que há três linhas de defesa das plantas para amenizar os efeitos sobre o crescimento vegetal. A primeira delas é a redução da área foliar, uma vez que a redução do turgor das células é o mais precoce efeito biofísico significativo do estresse hídrico, que afeta diretamente a expansão foliar e juntamente com a senescência das

folhas, a planta reduz a perda de água por transpiração. A segunda é o aprofundamento das raízes no solo úmido. A atividade fotossintética da planta é muito menos atingida que a expansão foliar, permitindo que maior proporção de assimilados vegetais seja distribuída ao sistema radicular. Por último, a terceira linha de defesa é o fechamento estomático, principalmente em condições onde o começo do estresse é mais rápido ou a planta alcançou sua área foliar plena antes de iniciar o estresse. Neste caso, o estômato fechado também reduz a transpiração.

Essas modificações morfofisiológicas nas plantas em resposta ao déficit hídrico, de maneira geral, apresentam impacto negativo sobre o seu crescimento e desenvolvimento. Segundo Coelho (2007), apesar dos extraordinários avanços científicos da biotecnologia nos últimos 10 anos, ainda são remotas as possibilidades de que uma planta em condição de deficiência hídrica permanente no solo possa atingir níveis de produtividade e de qualidade comercial da produção comparáveis aos de uma planta irrigada. Taiz e Zeiger (2004) mencionam que existe um conflito entre a conservação da água pela planta e a taxa de assimilação de CO₂ para produção de carboidratos.

Neste contexto, é de fundamental importância o conhecimento das condições ambientais durante o período de desenvolvimento das plantas, assim como também, as respostas das plantas a essas variações às quais estão propensas, principalmente quando o seu desenvolvimento, ou parte dele, se dá em condições desfavoráveis.

2.1.2.2 Déficit hídrico e cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é adaptada às condições de alta intensidade luminosa, altas temperaturas, e relativa escassez de água, uma vez que a cultura necessita de uma grande quantidade de água para suprir suas necessidades hídricas. Como a maioria das poáceas (gramíneas), é uma planta de metabolismo C₄, apresentando elevada eficiência na utilização e resgate de CO₂ da atmosfera. No entanto, essa eficiência pode variar em função da disponibilidade hídrica do solo (SEGATO et al., 2006).

Os danos causados pela deficiência hídrica na cultura da cana-de-açúcar dependem da intensidade e da duração do período de deficiência, da fase de

desenvolvimento da cultura em que ocorre e da variedade cultivada (SOARES et al., 2004).

Scardua (1985) salienta que é durante o estágio inicial da cultura que ocorre o estabelecimento vegetal ao solo. O déficit hídrico nesta fase pode acarretar um pior desenvolvimento radicular e baixo perfilhamento, resultando, portanto, num baixo aproveitamento da água e nutrientes disponíveis nos períodos posteriores.

Barbosa (2010) estudou em ambiente protegido, o efeito do déficit hídrico sobre as variedades RB867515 e SP81-3250, em diferentes profundidades de solos a partir do terceiro mês de idade da cultura e concluiu que a tolerância à seca das variedades estudadas é relativamente baixa, quando o nível de água disponível do solo é esgotado. De acordo com o autor, balanços hídricos com valores menores que 13 mm negativos causaram queda significativa na população final de plantas, sendo que, a partir de um valor acumulado de 35 mm negativos, nenhuma planta sobreviveu.

Durante a fase de crescimento dos colmos, a profundidade de solo explorada pelas raízes aumenta a capacidade da água disponível do solo e os efeitos das deficiências hídricas são mais difíceis de ocorrer (SCARDUA, 1985). O mesmo autor menciona que sob tensões de água no solo até 100 kPa a planta não reduz a taxa de alongação dos colmos. Quando a tensão se aproxima a 200 kPa a taxa de alongação é reduzida, todavia se irrigada, nesta condição, a alongação aumenta compensando o decréscimo observado anteriormente, não havendo redução real na taxa média de crescimento. Contudo, quando ocorrem tensões superiores a 200 kPa, a taxa de alongação é reduzida irreversivelmente.

Rosenfeld (1989) estudou o período crítico de deficiência hídrica para cana-planta em diversas fases de crescimento e diferentes épocas do ano. O autor induziu a deficiência hídrica com auxílio de abrigos de plásticos instalados no campo e concluiu que todas as fases da cultura apresentaram redução do crescimento em função do déficit aplicado. Entretanto, os efeitos sobre a produtividade foram muito mais acentuados quando este déficit ocorreu no período de 120 a 240 dias de idade da cultura, independente da época de plantio. O autor atribui a redução da produtividade à redução do tamanho, diâmetro e peso da cana. Vale ressaltar, que neste estudo, devido à metodologia de avaliação do crescimento do colmo, que só iniciava após estes

atingirem 10 cm, os déficits foram aplicados a partir de 67 dias para o plantio de fevereiro e 133 dias para o plantio de junho, não sendo avaliado o déficit hídrico na fase inicial da cultura.

Segundo Inman-Bamber (2004), o estresse hídrico tem maior efeito sobre a expansão do crescimento do limbo foliar do que a sua massa seca, afetando negativamente o crescimento da parte aérea, sobretudo a produção de folhas, acelerando a senescência foliar e da planta como um todo, podendo, ainda, levar a uma redução na interceptação da radiação, na eficiência do uso de água e na fotossíntese, bem como ao aumento da radiação transmitida para a superfície do solo.

Lucchesi (2008) menciona que em épocas de déficit hídrico, a planta apresenta as folhas mais enroladas, podendo reduzir de 10 a 20% da transpiração. Entretanto, o conteúdo hídrico interno além de influenciar a fotossíntese, pois folhas mais túrgidas apresentam maior área foliar, também influencia a translocação de fotoassimilados. Segundo o autor, em condições hídricas deficientes, pode haver acúmulo do material fotossintetizado, devido à dificuldade de translocação.

Mesmo quando se consideram as alterações morfofisiológicas, para evitar os efeitos negativos da deficiência hídrica, as plantas de cana-de-açúcar apresentam decréscimos significativos na produção de fitomassa (MACHADO et al., 2009). Redução de 35% na fitomassa de cana-de-açúcar foi verificada em consequência da restrição hídrica, em um período de alta demanda evaporativa em plantas jovens (INMAN-BAMBER, 2004).

Barbosa (2010) afirma que são poucos os trabalhos na literatura que descrevem o desenvolvimento das plantas quando em condições de déficit hídrico máximo, sendo que neste caso podem ocorrer até falhas no dossel da cultura pela morte das plantas.

Smit e Singels (2006) afirmam que o desenvolvimento do dossel afetado pelo estresse hídrico é um aspecto de crescimento e desenvolvimento da cana que ainda não foi exaustivamente investigado. Nas últimas décadas, muitos estudos foram conduzidos para avaliar o comportamento morfofisiológico das plantas em relação ao déficit hídrico; entretanto, considerações sobre o impacto da disponibilidade de água no solo sobre o crescimento e desenvolvimento das plantas têm recebido pequena atenção por parte dos pesquisadores; além disso, necessita-se caracterizar a ocorrência do

déficit hídrico em termos quantitativos e não qualitativamente, como tem sido utilizado (SANTOS; CARLESSO, 1998).

2.1.2.3 Influência sobre o desenvolvimento do sistema radicular

Um dos fatores de maior importância na relação planta-água-solo é a arquitetura e distribuição do sistema radicular, bem como sua dinâmica de crescimento (VASCONCELOS, 2002).

Para Rosolen (1994), quem define a profundidade das raízes da cana-de-açúcar é a água, relatando que a sobrevivência das raízes varia durante o ano agrícola em função das chuvas, quando ocorre veranico e a superfície seca, aumentam então as raízes em profundidade, e estas só ficam vivas onde existe umidade, sendo metabolicamente mais eficaz para a planta eliminar as raízes no período de estresse hídrico e, quando voltar a chover, desenvolver novas raízes.

Seguindo a mesma ideia, Vasconcelos e Casagrande (2010) verificaram que durante o período de déficit hídrico houve senescência de folhas acompanhada pela morte das raízes superficiais e das raízes mais jovens e tenras que se desidratam, ocorrendo perda de turgor das células e ressecamento dos tecidos mais novos. Após o reumedecimento, constataram a formação de novas raízes e a retomada do crescimento do sistema radicular.

O volume de solo explorado e o contato íntimo entre a superfície das raízes e o solo são essenciais para a absorção efetiva da água pelas raízes. O contato é maximizado pela emissão dos pêlos radiculares, com consequente aumento na área superficial e na capacidade de absorção de água. Além disso, o déficit hídrico estimula a expansão do sistema radicular para zonas mais profundas e úmidas do perfil do solo (SANTOS; CARLESSO, 1998).

De acordo com Korndörfer et al. (1989), quanto maior o sistema radicular de uma planta maior será a sua capacidade para explorar o solo e, conseqüentemente, a de aproveitar os nutrientes e a água disponível. O volume e a distribuição do sistema radicular são tão mais importantes quanto menor for a fertilidade do solo e maior a deficiência hídrica. De modo geral em solos profundos e sem impedimento físico,

quanto maior o volume de raízes de uma variedade, maior sua capacidade para aproveitar a água disponível e os nutrientes (KORNDÖRFER et al., 1989). Entretanto, de acordo com o autor, em solos rasos ou com impedimento físico (compactação) ou químico (fertilidade), a eficiência em aproveitar água e os nutrientes parece ser mais importante do que o volume e a massa radicular.

2.1.3 Eficiência no uso da água

Muitos pesquisadores têm proposto indicadores para avaliar a eficiência do uso de água (BOS et al., 1994; MOLDEN et al., 1998; PERRY et al., 1996). Um desses indicadores considera a resposta produtiva da cultura e está associado à produtividade da água (PA), que expressa a relação entre a quantidade produzida e o volume total de água aplicado ou consumido pela cultura (SILVA, 2009). Maschio (2011) menciona que a PA é um ótimo indicador para a análise e tomada de decisão, pois permite avaliar a variação da razão entre a produção e a quantidade de água utilizada, sugerindo valores que maximizem a utilização do fator de produção água.

Comumente, este indicador é utilizado como sinônimo de eficiência no uso da água (EUA). Entretanto, para a PA, considera-se a fração econômica do rendimento (IGBADUN et al., 2006; KAHLOWN et al., 2007). Neste trabalho, será adotado o termo EUA, uma vez que os dados de biomassa utilizados para o cálculo referem-se ao acúmulo de matéria seca apenas na fase inicial de desenvolvimento da cultura.

Vários autores têm evidenciado redução no valor de EUA para diversas culturas quando desenvolvidas com restrições de água no solo (DETAR, 2008; KARAM et al., 2007; LINDERSON et al., 2007). Não obstante, para a cana-de-açúcar, Smit e Singels (2006) mencionam que a magnitude de redução no valor de EUA depende da variedade, ciclo (cana-planta ou cana-soca), condições ambientais e práticas de manejo adotadas. Esses fatores afetam o desenvolvimento do dossel da cultura, alterando os processos de interceptação de radiação fotossinteticamente ativa, evapotranspiração, balanço de carbono e, conseqüentemente, os valores de acúmulo de matéria seca da cultura (SILVA, 2009).

A absorção contínua de água é essencial ao crescimento e desenvolvimento vegetal, pois a maioria das plantas, em clima tropical, chega a perder mais do que seu próprio peso em água, por dia, em certas condições (PIMENTEL, 2004). Comumente, em áreas irrigadas, a cana-de-açúcar tende a apresentar incrementos expressivos no valor de EUA quando comparado aos sistemas de produção de sequeiro, como resultado do incremento do balanço líquido de carbono, principalmente, quando a fase de maior crescimento desta cultura coincide com o período de maior disponibilidade hídrica (SILVA, 2009).

Em experimentos realizados em condições de campo, os valores de EUA apresentam grande variabilidade. Considerando peso dos colmos, Oliveira et al. (2011) encontraram valores na ordem de 5,96 a 7,98 kg m⁻³ e 11,1 a 18,3 kg m⁻³ em condições de sequeiro e irrigado, respectivamente, para diferentes variedades. Farias et al. (2008), estudando a variedade SP791011, encontraram valores de 3,99 e 7,22 kg m⁻³ para condições de sequeiro e irrigado, respectivamente. Gava et al. (2011) trabalhando com três variedades em condições de sequeiro e irrigação por gotejamento encontraram valores médios de 7,04 kg m⁻³.

Kingston (1994, apud INMAN-BAMBER; SMITH, 2005) em uma revisão de uma série de publicações sobre EUA em cana-de-açúcar na Austrália, verificou que este parâmetro variou de 8,37 a 20,94 kg m⁻³ (colmos frescos). Segundo o autor, com um limite de confiança de 95%, o valor médio de EUA obtido para a Austrália foi de 12,21 kg m⁻³.

Em trabalhos desenvolvidos em ambiente protegido, Maschio (2011) encontrou valores de EUA referente à biomassa seca total da parte aérea durante todo o ciclo da cultura variando entre 6,98 e 11,94 kg m⁻³, destacando-se as variedades SP81-3250 e RB92579, sob irrigação plena, e as variedades SP81-3250 e SP90-3414, em irrigação sob déficit.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Localização e caracterização da área experimental

O trabalho foi desenvolvido na área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em ambiente protegido (casa de vegetação), situada no município de Piracicaba - SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 42' 32" S, longitude 47° 37' 45" W e altitude de 548 m (Datum WGS84).

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, isto é, subtropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto), caracterizado por chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C e a do mês mais frio, inferior a 18 °C.

A casa de vegetação apresenta cobertura com filme plástico de polietileno transparente, com espessura de 150 µm e as laterais fechadas com tela tipo sombrite, com 30% de interceptação, seguindo a orientação Leste-Oeste. Foram distribuídas, em uma área útil de 160 m², 96 caixas de cimento amianto de 100 L, com dimensões de 60 cm x 40 cm x 45 cm, sendo estas dispostas em quatro faixas espaçadas de 80 cm entre linhas e 50 cm entre caixas, mantendo uma distância de 100 cm das laterais da estufa (Figura 4). A estrutura era provida de energia elétrica e um tanque reservatório com capacidade de 500 litros, abastecido continuamente por água potável derivada do sistema de abastecimento da ESALQ.

O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, textura franco arenosa, denominado Série “Sertãozinho”. As características químicas e físico-hídricas do solo para as quatro profundidades estudadas estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Os tratamentos constituíram-se da combinação de quatro profundidades de solo e oito níveis de déficit hídrico. Solos compactados geralmente apresentam maior resistência à penetração das raízes, permitindo que as plantas explorem um menor volume de solo. Com redução da profundidade efetiva do sistema radicular, há redução

Figura 4 - Vista geral da área experimental

Tabela 1 - Caracterização química do solo

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	M.O. (g dm ⁻³)	P -----(mg dm ⁻³) ----	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V %
					------(mmol _c dm ⁻³) -----							
0 - 10	5,43	12	49	50	1,1	20	2	0,01	21	23,1	43,7	53
0 - 20	5,66	12	56	28	0,7	25	2	0,01	19	27,7	46,3	60
0 - 30	5,69	12	53	24	0,5	22	2	0,01	18	24,5	42,9	57
0 - 40	5,63	21	64	20	0,7	24	3	0,01	19	27,7	46,7	59

Tabela 2 - Caracterização físico-hídrica do solo

Camada (cm)	CC	PMP	CAD (mm)	D _s	D _p	PT (%)	Frações granulométricas		
	g g^{-1}			g cm^{-3}			Areia	Silte	Argila
							%		
0 - 10	0,148	0,069	12,11	1,53	2,65	42,3	75,1	7,8	17,1
10 - 20	0,151	0,065	12,81	1,50	2,65	43,4	74,5	8,0	17,5
20 - 30	0,151	0,065	12,81	1,50	2,65	43,4	74,5	8,0	17,5
30 - 40	0,143	0,078	10,88	1,69	2,64	36,0	74,4	8,6	17,0

CC: umidade na capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de -4,85 kPa). PMP: umidade no ponto de murcha permanente (correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de -1500 kPa). CAD: capacidade de água disponível. D_s: densidade do solo. D_p: densidade de partículas do solo. PT: porosidade total do solo. Adaptado de Chaves, 2008.

da água disponível para as plantas. A ideia foi simular diferentes condições para o desenvolvimento da cultura, iniciando com um cenário desfavorável de preparo do solo, onde apenas uma camada de 10 cm estaria em condições químicas (correção e adubação) e físicas (descompactação) para o desenvolvimento da planta, até um cenário ideal, com um preparo mínimo de 40 cm de solo. Para simular essas diferentes profundidades de solo, as caixas foram preenchidas com diferentes camadas de pedra brita nº 02, e solo, conforme descrito por Chaves (2008), compondo camadas de 10, 20, 30 e 40 cm, denominadas de P10, P20, P30 e P40, respectivamente. Para separação da camada de pedra e de solo utilizou-se manta de tecido geotêxtil (Figura 5). Os valores de capacidade de água disponível (CAD) para os tratamentos P10, P20, P30 e P40 foram respectivamente de 12,11; 24,92; 37,73 e 48,61 mm.

Figura 5 - Esquema de montagem das caixas para os tratamentos de profundidade do solo

Os níveis de déficit hídrico foram representados pela evapotranspiração de referência acumulada (ET_{0ac}), sendo eles de 0, 40, 80, 120, 160, 200, 240 e 280 mm, acumulados do plantio até o tratamento ser novamente irrigado. Para notação, denominou-se N0, N40, N80, N120, N160, N200, N 240 E N280, respectivamente.

Após o plantio, a umidade do solo foi elevada à capacidade de campo em todos os tratamentos, iniciando a contagem da ET_{0ac} no dia seguinte. Dessa forma, nas plantas do tratamento N0, manteve-se a irrigação, enquanto nas demais esta foi suspensa até que atingisse o nível de ET_{0ac} pré-estabelecido para cada tratamento, onde a partir de então, a irrigação foi mantida até o final do experimento.

Como critério de adoção dos níveis de déficit estudados, desejava-se que todas as plantas de um mesmo tratamento de déficit não sobrevivessem ao nível correspondente aplicado, após o retorno da irrigação. Devido à relativa escassez dessas informações na literatura, estimou-se que 280 mm seriam suficientes para atingir tal objetivo. Dessa forma, o experimento foi conduzido até atingir o tratamento de déficit que proporcionasse a morte total das plantas para todos os tratamentos de profundidade de solo.

O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento, com gotejador tipo botão autocompensado (PCJ-CNL) com duas vazões diferentes em função da profundidade da camada de solo: P40 - 2 gotejadores de 4 L h^{-1} ; P30 - 2 gotejadores de 4 L h^{-1} ; P20 - 3 gotejadores de 2 L h^{-1} ; e P10 - 2 gotejadores de 2 L h^{-1} . Essas diferentes vazões visavam facilitar o controle do tempo de irrigação. Em cada gotejador adaptou-se um tê de derivação, microtubos e haste plástica na extremidade de cada microtubo para fixação no solo, permitindo assim melhor distribuição da água em toda a superfície da caixa. A irrigação era realizada de forma independente para cada tratamento, utilizando-se 32 registros de esfera, sendo que a abertura de cada registro habilitava a irrigação em três caixas.

2.2.2 Delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento de blocos ao acaso (DBC) em esquema fatorial 4 x 8, com três blocos, totalizando 96 unidades experimentais, cada qual representada por

uma caixa de cimento amianto de 100 L. Cada unidade continha, inicialmente, seis gemas de cana-de-açúcar, tendo-se utilizado na análise estatística os valores resultantes da média dessas plantas. Os parâmetros avaliados durante o experimento foram analisados utilizando-se o programa estatístico R, versão 2.13 (R, 2011).

2.2.3 Medidas Meteorológicas

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método padrão proposto pela FAO, conforme a eq. (1).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (DPV)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

onde:

ET₀ - evapotranspiração de referência, em mm dia⁻¹;

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

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

T - temperatura média do ar a 2 m de altura, em °C;

u₂ - velocidade do vento a 2 m de altura, em m s⁻¹;

DPV - déficit de pressão de vapor, em kPa;

Δ - declividade da curva de pressão de vapor, em kPa °C⁻¹; e

γ - constante psicrométrica, em kPa °C⁻¹;

Os dados foram obtidos a cada 30 segundos e integrados inicialmente a cada 15 minutos por meio de sistema de aquisição ou “datalogger” (Campbell CR1000). O saldo de radiação (R_n) foi estimado a partir da radiação solar global, monitorada com piranômetro (LP02-L12 - Campbell Sci.). Para a umidade relativa e temperatura do ar, foi utilizado o sensor Vaisala (HMP45CL12 – Campbell Sci.). Os sensores foram instalados a 2 m de altura no centro da estufa. Para estimativa do DPV e o saldo de radiação, utilizou-se a metodologia descrita por Allen et al., 1998.

Para o cálculo da ET₀, desprezou-se o fluxo diário de calor no solo (G), pois de acordo com Allen et al. (1998), como sua magnitude é relativamente pequena, ele pode ser desconsiderado para períodos de 24 horas.

Em função da velocidade do vento no interior da estufa ser muito baixa, esse valor foi fixado em 0,5 m s⁻¹. O Boletim FAO 56 recomenda que, em geral, a velocidade do vento a 2 m (u_2) deve ser mantida em um valor mínimo de cerca de 0,5 m s⁻¹, quando utilizado na equação de ET₀. Isso é necessário para explicar os efeitos da instabilidade da camada limite e flutuabilidade do ar que promovem a troca de vapor à superfície quando o ar está calmo. Este efeito ocorre quando a velocidade do vento é baixa e a flutuação de ar quente provoca a troca de ar na superfície. Ao estabelecer o valor de u_2 em 0,5 m s⁻¹ na equação, melhora-se a precisão da estimativa, nas condições de velocidade do vento muito baixas (ALLEN et al., 1998).

2.2.4 Correção do solo, plantio e condução da cultura

De acordo com a caracterização química do solo (Tabela 1) e a recomendação do boletim 100 (RAIJ et al., 1997), no dia 15 de novembro de 2010, realizou-se a aplicação de calcário dolomítico equivalente à dosagem de uma tonelada por hectare (PRNT 100%) para todos os tratamentos. Embora os valores de saturação por bases estivessem bem próximos dos níveis desejáveis para a cultura, Raij et al. (1997) recomendam a aplicação dessa dosagem quando o teor de Magnésio trocável for inferior a 5 mmol/dm³.

Quanto à adubação, as doses de nutrientes aplicadas para cada tratamento de solo (Tabela 3) foram calculadas seguindo a recomendação de Raij et al. (1997) para uma produção esperada de 150 t ha⁻¹ e a caracterização química do solo (Tabela 1).

Tabela 3 - Dose equivalente de nutrientes aplicados em kg ha⁻¹

Tratamento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
P10	30	60	84
P20	30	60	105
P30	30	60	105
P40	30	60	105

Para o fornecimento dos nutrientes, utilizaram-se os adubos sulfato de amônio, fosfato monoamônico e cloreto de potássio. Com a aplicação dos tratamentos de déficit hídrico, a aplicação dos adubos após o plantio seria desfavorável, pois alguns tratamentos receberiam adubos, entretanto não receberiam água. Para evitar esse problema, toda a adubação foi realizada 15 dias antes do plantio das mudas. Para tanto, a adubação potássica foi reduzida em 30% dos valores recomendados pelo boletim 100, e a adubação nitrogenada realizada apenas no plantio.

A variedade utilizada foi a RB867515, amplamente cultivada no Brasil e no estado de São Paulo. Segundo censo varietal realizado por Chapola et al. (2010), esta variedade representava 20,5% da área total cultivada com cana-de-açúcar nos estados de São Paulo, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul no ano de 2009. As mudas utilizadas foram obtidas de cana-planta com nove meses de idade, na Fazenda Santana de Cima, município de Itirapina-SP, pertencente à Usina Itacema.

As mudas foram seccionadas em toletes contendo três gemas. Visando obter uma melhor uniformidade das mudas em função da variação da idade das gemas, da concentração hormonal e da quantidade de reservas ao longo do colmo, as partes apical e basal foram descartadas, utilizando-se, portanto, apenas mudas do terço médio do colmo.

Os toletes foram plantados no dia 08 de fevereiro de 2011, logo após o seccionamento dos colmos. Para tanto, foi aberto um pequeno sulco na caixa, posicionando-se os toletes de forma que todas as gemas ficassem voltadas para as laterais, o que é possível em função da filotaxia alternada da planta. Quando a gema mais nova está voltada para cima, esta emergirá primeiro e poderá afetar a emergência das outras gemas da mesma muda, tanto pela dominância apical que exercerá sobre as demais, quanto pela maior distância que as gemas voltadas para baixo percorrerão para alcançar a superfície. Dessa forma, este posicionamento permite maior uniformidade de brotação e emergência das mudas. Em cada caixa foram plantados dois toletes, totalizando 6 gemas por caixa. Em seguida, os toletes foram cobertos com uma camada de 5 cm de solo e para todos os tratamentos, a umidade do solo foi elevada até a capacidade de campo. O croqui da área experimental é apresentado na Figura 6 e o processo de preparo e plantio das mudas é ilustrado na Figura 7.

N0 P40	N40 P40	N80 P40	N120 P40	Bloco 1
N0 P20	N40 P20	N80 P20	N120 P20	
N0 P10	N40 P10	N80 P10	N120 P10	
N0 P30	N40 P30	N80 P30	N120 P30	
N240 P30	N200 P30	N160 P30	N280 P30	
N240 P20	N200 P20	N160 P20	N280 P20	
N240 P10	N200 P10	N160 P10	N280 P10	
N240 P40	N200 P40	N160 P40	N280 P40	
N120 P30	N80 P30	N40 P30	N0 P30	Bloco 2
N120 P10	N80 P10	N40 P10	N0 P10	
N120 P40	N80 P40	N40 P40	N0 P40	
N120 P20	N80 P20	N40 P20	N0 P20	
N200 P30	N240 P30	N280 P30	N160 P30	
N200 P20	N240 P20	N280 P20	N160 P20	
N200 P40	N240 P40	N280 P40	N160 P40	
N200 P10	N240 P10	N280 P10	N160 P10	
N80 P40	N120 P40	N0 P40	N40 P40	Bloco 3
N80 P30	N120 P30	N0 P30	N40 P30	
N80 P20	N120 P20	N0 P20	N40 P20	
N80 P10	N120 P10	N0 P10	N40 P10	
N280 P10	N240 P10	N200 P10	N160 P10	
N280 P30	N240 P30	N200 P30	N160 P30	
N280 P20	N240 P20	N200 P20	N160 P20	
N280 P40	N240 P40	N200 P40	N160 P40	

Figura 6 - Croqui de distribuição dos tratamentos na área experimental

Figura 7 - Lavoura onde foram retiradas as mudas (A); Facão utilizado para seccionamento dos toletes (B); Detalhe da parte apical e basal do colmo descartadas (C); Posicionamento do tolete na caixa (D); Detalhe do posicionamento das gemas para as laterais (E); Cobrição dos toletes com solo e detalhe da montagem do sistema de irrigação nas caixas (F)

2.2.5 Manejo da irrigação

Para o manejo da irrigação, foram instalados tensiômetros de punção em diferentes profundidades, de acordo com os tratamentos: a 5 cm de profundidade para o tratamento P10; a 5 e 15 cm para o tratamento P20; a 5, 15 e 25 cm para o tratamento P30; e a 5, 15, 25 e 35 cm para o tratamento P40 (Figura 8 - A), sendo a profundidade considerada da superfície do solo até o centro da cápsula.

As leituras foram realizadas utilizando um tensímetro digital (Figura 8 - B), em um intervalo de 2 a 3 dias, de forma que a tensão do solo para os tratamentos que estavam sendo irrigados não excedesse 30 kPa. Considerou-se que o potencial medido por cada tensiômetro representava o potencial médio de uma camada de 10 cm, ou seja, as medidas dos tensiômetros instalados a 5, 15, 25 e 35 cm representavam a umidade das camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm, respectivamente.

Figura 8 - Profundidade de instalação e posicionamento dos tensiômetros na caixa (A); Leitura do potencial mátrico com tensímetro digital (B)

A partir das leituras dos tensiômetros, a umidade do solo foi estimada pela equação de van Genuchten (1980) eq.(2), com os parâmetros apresentados na Tabela 4.

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

onde:

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

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

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

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

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

Ψ_m - potencial mátrico, em kPa .

Tabela 4 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten (1980)

Camada (cm)	$\theta_s (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$	$\theta_r (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$	$\alpha (\text{kPa}^{-1})$	m	n
0-10	0,421	0,098	1,3464	0,1799	2,7175
10-20	0,412	0,085	1,5708	0,1648	2,5028
20-30	0,412	0,085	1,5708	0,1648	2,5028
30-40	0,374	0,122	1,1291	0,2749	1,5619

Adaptado de Chaves, 2008.

Estimados os valores de umidade do solo, foi calculado para a camada correspondente à leitura, o volume de água necessário para elevar a umidade do solo à capacidade de campo. Para os tratamentos P20, P30 e P40, os somatórios dos volumes de cada camada correspondiam ao volume total aplicado na caixa.

O monitoramento da umidade do solo foi realizado em uma das três caixas de cada tratamento. Os volumes de água aplicados nas outras duas caixas foram iguais ao da caixa monitorada. Ao final do experimento, a umidade do solo foi elevada à capacidade de campo em todos os tratamentos, permitindo quantificar o volume total de água aplicado.

Para os tratamentos a partir de N80, algumas profundidades de solo estudadas atingiram níveis baixos de umidade ($\psi_m < -90$ kPa), não sendo possível estimar pela tensiometria. Dessa forma, quando atingido o nível de $ET0_{ac}$, antes de voltar a irrigação, foram retiradas amostras de solo para quantificação da umidade pelo método gravimétrico. Os pontos amostrados foram equivalentes à profundidade de instalação dos tensiômetros, de acordo com os tratamentos de profundidade de solo. As amostras retiradas foram colocadas em recipientes de alumínio com peso pré-determinado e com boa vedação, sendo posteriormente pesadas (m_u), levadas à estufa (105°C) por 48 horas e pesadas novamente (m_s), obtendo-se a umidade atual do solo de acordo com a eq. (3).

$$U = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad (3)$$

onde:

U - umidade gravimétrica, em g g^{-1} ;

m_u - massa de solo úmido, em g; e

m_s - massa de solo seco em estufa, em g.

No momento do retorno da irrigação para os tratamentos a partir de N80, não se conhecia o valor da umidade do solo, uma vez que não era possível estimar pela tensiometria e a determinação gravimétrica não era imediata. Dessa forma, aplicava-se 80% da capacidade de água disponível, realizava-se a escorva dos tensiômetros e no dia seguinte, a umidade do solo então era elevada à capacidade de campo.

2.2.6 Análise das plantas

2.2.6.1 Porcentagem de brotação e emergência

Para todos os tratamentos, semanalmente, foi contado o número de gemas que emergiram. Para tanto, considerou-se gema emergida toda aquela que brotou e atingiu a superfície do solo.

2.2.6.2 Porcentagem de touceiras vivas

Após o retorno da irrigação para cada tratamento, avaliou-se a porcentagem de plantas (touceiras) que sobreviveram. Para os níveis de déficit mais acentuados, as plantas visualmente apresentavam-se secas, sendo necessário um período de aproximadamente 10 dias para a confirmação, através da base das folhas do cartucho, que eram as primeiras a retomar o desenvolvimento após o período de déficit, caso a planta ainda estivesse viva.

2.2.6.3 Extensão máxima do colmo primário

A metodologia geralmente utilizada para obtenção desta medida considera a altura da última região auricular visível da folha +1 (a primeira folha com “colarinho” visível). Entretanto, conforme observado por Barbosa (2010), plantas de cana-de-açúcar em condições de déficit acentuado apresentam modificações na base das folhas e bainhas, o que dificulta a identificação da última região auricular. Dessa forma, adotou-se a mesma metodologia utilizada pelo autor, que considera a extensão máxima do colmo primário, tomada da superfície do solo até a extremidade (ponta) da folha mais alta (esticada manualmente). Essas medições foram realizadas com auxílio de uma fita métrica, a cada 30 dias após o plantio.

2.2.6.4 Número de perfilhos

Avaliou-se o perfilhamento em todos os tratamentos contando o número de perfilhos. Considerou-se perfilho todo broto formado a partir do tolete plantado, incluindo o colmo primário. A contagem foi realizada a cada 30 dias.

2.2.6.5 Acúmulo de matéria seca

Finalizado o experimento, as plantas foram coletadas para análise de matéria seca. O material retirado das parcelas foi coletado separadamente para quantificação

de matéria seca do colmo primário e matéria seca dos demais perfilhos. Após o procedimento da coleta, o material foi levado à estufa com sistema de circulação de ar quente forçado, à temperatura de 65 °C até atingir peso constante, que ocorreu após 72 horas. As massas foram obtidas em balança analítica digital com precisão de 0,01 g.

2.2.7 Análise do sistema radicular

2.2.7.1 Distribuição do sistema radicular

Compreender o que acontece abaixo da superfície do solo, principalmente com relação ao crescimento e à distribuição de raízes no perfil, permite também uma melhor compreensão dos fenômenos ocorridos na parte aérea das plantas. Entretanto, de acordo com Vasconcelos et al. (2003), o estudo de sistema radicular é muito trabalhoso, e além disso, a variabilidade na distribuição das raízes é alta, o que pode levar a resultados que não representem a realidade. Os autores aludem que não existe uma forma perfeita de avaliar as raízes, pois a adequação de um método para o estudo do sistema radicular depende da condição "in situ". Dessa forma, optou-se por avaliar o sistema radicular apenas para o tratamento de profundidade P40 e os tratamentos de déficit N0, N80 e N160.

Utilizou-se o método do trado, com a quantificação de matéria de raízes secas. As amostras foram coletadas em duas camadas, sendo elas de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm. A extração das amostras foi feita com trado de 7,1 cm de diâmetro interno, com base serrilhada, descrito por Fujiwara et al. (1994). Durante a coleta, buscou-se amostrar os pontos nas diferentes caixas sempre equidistantes da touceira e da lateral da caixa, procurando-se manter uma uniformidade no procedimento de amostragem.

Em cada caixa de cimento amianto avaliada, foram retiradas duas amostras para cada profundidade, totalizando 6 repetições para cada tratamento. As amostras de solo com raízes de cada camada de 20 cm (volume de 0,79 dm³) foram imersas em água, agitadas manualmente e passadas em peneiras de 25 mesh. Este procedimento foi realizado três vezes a fim de separar as raízes e o solo. Em seguida, as raízes foram

secas em estufa a 65 °C, por 72 horas. Posteriormente, foram separadas das impurezas (solo e palha) e pesadas em balança analítica digital com precisão de 0,01 g.

Para visualização da distribuição do sistema radicular nestas caixas avaliadas, com auxílio de uma serra mármore, as caixas foram abertas e o sistema radicular exposto.

2.2.7.2 Estimativa do particionamento de fotoassimilados

Com os valores de matéria seca das raízes referente ao volume de solo amostrado com o trado (0,79 dm³), extrapolaram-se os valores para toda a caixa. Para tanto, considerou-se um volume útil de solo de 96 litros e a média dos dois valores amostrados em cada caixa. Os valores de matéria seca da parte aérea foram obtidos somando-se todas as plantas que se desenvolveram nas respectivas caixas, e então, foi estimada a relação raiz - parte aérea.

2.2.8 Eficiência no uso da água

A partir do volume total de água aplicado para cada tratamento e os valores de matéria seca da parte aérea, foi avaliada a eficiência no uso da água da cana-de-açúcar durante a fase inicial de desenvolvimento (g L⁻¹). Como o monitoramento de umidade do solo foi realizado em uma das três caixas de cada tratamento, os volumes de água aplicados foram iguais para as três repetições, variando apenas, os valores de matéria seca da parte aérea, que foram obtidos somando todas as plantas que se desenvolveram nas respectivas caixas. A eficiência no uso da água foi calculada conforme a eq. (4).

$$EUA = \frac{\text{Matéria seca total da parte aérea (g)}}{\text{Volume total de água aplicado (L)}} \quad (4)$$

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Dados meteorológicos

O experimento foi conduzido durante o período de 08/02/2011 até 09/05/2011, totalizando 90 dias. O período de déficit hídrico e os respectivos níveis de ET0 acumulados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Retorno da irrigação em função da ET0 acumulada

Tratamento	Retorno Irrigação	Intervalo		Total acumulado	
		Dias	ET0 (mm)	Dias	ET0 (mm)
N0	09/02/2011	1	3,81	1	3,81
N40	21/02/2011	12	42,24	12	42,24
N80	09/03/2011	16	39,08	28	81,32
N120	25/03/2011	16	40,13	44	121,46
N160	10/04/2011	16	40,66	60	162,11
N200	26/04/2011	16	39,46	76	201,57

Os tratamentos N0, N40, N80, N120 N160 e N200, referem-se aos dados reais de ET0 acumulados de 3,81; 42,24; 81,32; 121,46; 162,11 e 201,57 mm, respectivamente. O tratamento de déficit hídrico N200 foi suficiente pra promover a morte de todas as plantas, independente da profundidade de solo estudada, conforme será abordado posteriormente. Dessa forma, o experimento foi concluído 14 dias após o retorno da irrigação do tratamento N200, não se obtendo os valores de N240 e N280.

A variação dos dados meteorológicos durante o experimento é apresentada na Figura 9 e os dados diários encontram-se no anexo A. Pode-se observar que no primeiro intervalo entre os tratamentos de déficit hídrico, os valores de ET0 foram maiores, resultando em um menor número de dias para o retorno da irrigação, que foi de 12 dias. Neste período, foram registrados os maiores valores de energia térmica e radiante e os menores valores de umidade relativa média. Para os demais tratamentos, a variação manteve-se semelhante, resultando em intervalos de tempo maiores, todos de 16 dias.

O máximo valor de ET0 ocorreu 4 DAP ($4,12 \text{ mm dia}^{-1}$), quando também ocorreu a maior quantidade de energia radiante ($16,31 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). O valor mínimo incidiu 54

DAP ($1,09 \text{ mm dia}^{-1}$), com o menor valor de energia radiante ($2,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) registrado no período, uma vez que a radiação solar é a variável de maior efeito sobre a estimativa do valor de ET0 (CONCEIÇÃO; MARIN, 2004).

Figura 9 - Comportamento diário das variáveis meteorológicas; temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), temperatura média (Tmed), umidade relativa máxima (URmax), umidade relativa mínima (URmin), umidade relativa média (URmed), radiação solar (Rs) e evapotranspiração de referência estimada (ET0)

A temperatura média durante todo o período foi de 25,6 °C, sendo que a máxima das médias ocorreu no dia seguinte ao plantio (29,68 °C) e a mínima incidiu 79 DAP (19,47 °C). De forma geral, o período apresentou condições de temperaturas favoráveis à cultura, sendo que para um ótimo crescimento, o ambiente deve apresentar médias de temperaturas diurnas entre 22 e 30 °C (BARBIERI E VILLA NOVA, 1977 apud BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007).

2.3.2 Dados de umidade do solo

Os dados de umidade do solo antes do retorno da irrigação para todos os tratamentos são apresentados na Tabela 6. A partir do déficit hídrico N80, o solo atingiu valores de umidade abaixo do ponto de murcha permanente em todas as profundidades estudadas. Os valores referem-se à umidade média das respectivas caixas.

Tabela 6 - Umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para as diferentes profundidades antes do retorno da irrigação de cada tratamento de déficit hídrico

Profundidade do solo	Déficit					
	N0	N40	N80	N120	N160	N200
P10	0,227	0,137	0,024	0,018	0,017	0,017
P20	0,227	0,159	0,052	0,041	0,034	0,031
P30	0,227	0,187	0,068	0,052	0,045	0,037
P40	0,230	0,210	0,098	0,060	0,060	0,052

A variação dos valores mínimos de umidade do solo alcançados para os diferentes níveis de déficit hídrico e profundidades de solo é apresentada nas Figuras 10 e 11. De maneira geral, os valores de umidade do solo para as profundidades menores foram inferiores aos da profundidade de 40 cm. O menor volume de solo explorado e, conseqüentemente, a menor CAD destes solos, fazia com que a perda de água em proporção fosse maior, resultando nos menores valores de umidade. Como a irrigação das plantas para todos os tratamentos era realizada no mesmo dia, as profundidades P30 e P40 apresentavam valores de umidade superiores aos das profundidades P10 e P20 no momento da irrigação, conferindo, portanto, maior disponibilidade hídrica para as plantas, proporcionalmente ao aumento da profundidade do solo.

Figura 10 - Valores mínimos de umidade do solo alcançados em função do déficit hídrico nas diferentes profundidades de solo

Figura 11 - Valores mínimos de umidade do solo alcançados em função da profundidade nos diferentes níveis de déficit hídrico

O déficit para as profundidades menores foi mais severo. Ao analisar, por exemplo, o período necessário para a umidade atingir o ponto de murcha permanente, o tratamento P40 apresentou esta umidade aproximadamente 12 dias após o tratamento P10. A grande perda de umidade nesta fase inicial pode ser atribuída à radiação solar incidente diretamente sobre a superfície do solo. A radiação ocasionava a perda da água para a atmosfera e, para a profundidade P10, a qual não tinha camada de solo subjacente, conseqüentemente, não ocorria reposição desta água. Com a redução da umidade do solo e a alta incidência de radiação, há um aumento da temperatura do solo, acentuando ainda mais a perda de água para a atmosfera. De acordo com Oliveira et al. (2005), as variações na umidade e temperatura do solo tendem a diminuir com o aumento da profundidade.

2.3.3 Respostas biométricas das plantas ao déficit hídrico para diferentes profundidades de solo

2.3.3.1 Porcentagem de brotação e emergência

Nos primeiros 15 DAP, a temperatura média foi de 28,31 °C, sendo superior à média do período, o que favoreceu a brotação e emergência. Barbieri e Villa Nova (1977, apud BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007), concluíram que a temperatura ótima para brotação das gemas é superior nesta fase, variando de 32 a 38 °C.

A análise de variância para este parâmetro indica que os fatores estudados atuam independentemente, não havendo interação significativa entre eles (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância referente à brotação e à emergência dos perfilhos aos 60 DAP submetidos a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)

FV	GL	Estatística F
Bloco	2	0,714 ^{ns}
Déficit	5	0,340 ^{ns}
Prof	3	4,995*
Déficit x Prof	15	1,160 ^{ns}
Resíduo	46	-
CV (%)		18,18

* Significativo a 5% de probabilidade, ^{ns}: não significativo.

Ao avaliar os efeitos simples de cada tratamento (profundidade do solo e déficit hídrico), observa-se que os níveis de déficit hídrico não influenciaram a brotação e a emergência das mudas, indicando que a umidade inicial à capacidade de campo é suficiente para promover o intumescimento e iniciar os processos fisiológicos que procedem na emergência do broto (Tabela 8).

Tabela 8 - Análise de médias da brotação e da emergência dos perfilhos aos 60 DAP para os diferentes níveis de déficit hídrico

Tratamento	N0	N40	N80	N120	N160	N200
Emergência (%)	79,17	79,17	76,39	81,94	83,33	79,17

De acordo com o teste F a 5% de probabilidade, as médias desse fator são estatisticamente iguais.

Apesar de não haver diferença significativa na porcentagem de brotação e na emergência em função do déficit hídrico, observou-se que as plantas irrigadas apresentavam um maior desenvolvimento inicial em relação às não irrigadas, sobretudo para a profundidade de 10 cm (Figura 12). Isso permite inferir que o déficit hídrico após o início do processo de brotação não interfere na quantidade, estando mais relacionado com a qualidade da brotação, conforme será discutido posteriormente.

Estes resultados sugerem uma eventual irrigação por volta do plantio, caso este seja realizado em períodos de baixa precipitação ou se incidirem veranicos.

Figura 12 - Desenvolvimento das plantas aos 14 DAP em solos com profundidade de 10 cm, irrigado (A) e não irrigado (B) e em solos com 40 cm de profundidade, irrigado (C) e não irrigado (D)

Ao analisar o efeito da profundidade do solo, observa-se que há influência sobre o parâmetro analisado (Tabela 9). Apenas a profundidade P10 apresentou valores significativamente menores de brotação e emergência.

Tabela 9 - Análise de médias da brotação e da emergência dos perfilhos aos 60 DAP para as diferentes profundidades de solo

Tratamento	P10	P20	P30	P40
Emergência (%)	68,51 b	82,40 a	85,18 a	83,33 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

A umidade do solo para o tratamento P10 apresentou valores inferiores aos demais durante todo o tempo de avaliação. A baixa capacidade deste solo em armazenar água afetou diretamente a brotação e a emergência das mudas, mesmo para o tratamento irrigado. Vasconcellos e Casagrande (2010) citam que a presença de camadas compactadas impede ou reduz o crescimento radicular para camadas mais profundas e resulta em um sistema mais superficial, tornando os processos de brotação e de desenvolvimento menos favoráveis. Segundo os autores, de nada adianta o solo estar úmido, se este for compactado.

2.3.3.2 Porcentagem de touceiras vivas

Os níveis de déficit hídrico que causaram a morte das plantas variaram em função da profundidade do solo (Figura 13). Para a profundidade de 10 cm, a partir de 80 mm de ET_{0ac} , 10,78% das plantas já haviam morrido, enquanto que nas demais profundidades, esse nível de déficit não causou redução na população de plantas.

Quando o nível de déficit hídrico atingiu 120 mm de ET_{0ac} , houve morte de 65,55% e 12,23% das plantas para a profundidade de 10 e 20 cm, respectivamente, sendo que este nível de déficit não alterou a população de plantas para a profundidade de 30 e 40 cm de solo. Entretanto, observou-se uma redução drástica no número de plantas entre os níveis de 120 e 160 mm de ET_{0ac} , em que sobreviveram apenas 33% das plantas para a profundidade de 40 cm e 5,56% para a profundidade de 30 cm. Isto nos indica que o nível de 120 mm de ET_{0ac} para a cultura da cana-de-açúcar é bem crítico, sendo necessária, se possível, uma intervenção através da irrigação, uma vez que a redução do número de plantas neste período trará prejuízos por vários anos, pois causará redução no dossel da cultura durante todos os cortes seguintes.

Figura 13 - Porcentagem de touceiras vivas para cada profundidade de solo em função do déficit hídrico

Através da interpolação linear dos valores da Figura 13, estimou-se a porcentagem de touceiras vivas para intervalos menores de $ET0_{ac}$ nas diferentes profundidades de solo analisadas, conforme apresentado nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Estimativa da porcentagem de touceiras vivas para as profundidades P10 e P20 (CAD de 12,11 e 24,92mm) em função do déficit hídrico ($ET0_{ac}$)

Profundidade do solo	ET0 acumulada (mm)								
	80	90	100	110	120	130	140	150	160
P10	89,22	75,53	61,83	48,14	34,45	25,83	17,22	8,61	0,00
P20	100,00	96,94	93,88	90,83	87,77	65,83	43,88	21,94	0,00

Tabela 11 - Estimativa da porcentagem de touceiras vivas para as profundidades P30 e P40 (CAD de 37,73 e 48,61mm) em função do déficit hídrico ($ET0_{ac}$)

Profundidade do solo	ET0 acumulada (mm)								
	120	130	140	150	160	170	180	190	200
P30	100,00	76,39	52,78	29,17	5,56	4,17	2,78	1,39	0,00
P40	100,00	83,25	66,50	49,75	33,00	24,75	16,5	8,25	0,00

Segundo Stolf (1986), as falhas entre 30 e 50 cm nem sempre afetam a qualidade final do *stand*, uma vez que, nestas condições, o perfilhamento pode ser estimulado pela maior radiação solar, que termina por compensar o número final de colmos na lavoura. Entretanto, de acordo com a metodologia proposta pelo autor, a partir de 50% de falhas, recomenda-se o replantio da área.

O estabelecimento inicial da cultura é de extrema importância, por interferir diretamente na longevidade do canavial, e por consequência, nos custos de produção e no retorno econômico. Caso ocorra perda significativa do *stand* inicial, os custos da operação de replantio giram em torno de R\$2.164,74 por hectare, uma vez que a operação de plantio corresponde a 49,8% dos custos de renovação da lavoura (FNP, 2011). Outro fator a ser considerado refere-se ao maior tempo necessário até o primeiro corte, que pode influenciar demasiadamente o planejamento dos fornecedores e da usina.

Smit e Singels (2006) mencionam que a formação do dossel da cultura desempenha papel importante em seu rendimento, interceptando a radiação solar, influenciando, sobremaneira, nos processos fotossintéticos e de transpiração da cultura, além de evitar o aparecimento de ervas daninhas, sendo, portanto, fator crucial na determinação do rendimento final da cultura.

O nível de déficit hídrico de 200 mm de ET_{0ac} causou a mortalidade de 100% das plantas em todas as profundidades estudadas. Observa-se que, a partir de 80 mm de ET_{0ac} , a umidade do solo encontrava-se abaixo do ponto de murcha permanente para todas as profundidades, sendo que as profundidades menores apresentaram níveis mais críticos. De acordo com Taiz e Zeiger (2004), após o solo atingir esses valores de umidade, a liberação da água para as raízes é lenta, pois a resistência do solo ao fluxo da água é grande, o que não permite a reidratação noturna de plantas que murcharam durante o dia. Isto sugere que a manutenção da muda viva por um período relativamente longo em solos com teores de umidade muito baixos, deve-se às reservas do tolete, destacando-se a importância da utilização de mudas de boa qualidade.

Essa reidratação é mais tarde impedida pela resistência dentro da planta, que é muito maior que aquela dentro do solo. Ao secarem, as células vegetais encolhem. Quando as raízes encolhem, a sua superfície pode se afastar das partículas do solo

que retêm a água e é possível que os delicados pêlos radiculares sejam danificados. Além disso, como as raízes expandem-se lentamente durante o dessecamento, a camada externa do seu córtex muitas vezes torna-se extensivamente coberta por suberina, um lipídeo impermeável à água, aumentando a resistência ao fluxo hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2004).

2.3.3.3 Extensão máxima do colmo primário

Nas avaliações realizadas durante o experimento, observou-se interação significativa entre os fatores níveis de déficit hídrico e profundidade do solo, indicando que a extensão máxima do colmo primário em função do déficit hídrico é influenciada pela profundidade do solo e vice-versa (Tabela 12).

Tabela 12 - Resumo da análise de variância referente à extensão máxima do colmo primário das plantas submetidas a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)

FV	Estatística F			
	GL	30 DAP	60 DAP	90 DAP
Bloco	2	0,179 ^{ns}	0,627 ^{ns}	0,527 ^{ns}
Déficit	5	26,995*	71,830*	93,305*
Prof	3	111,668*	69,655*	58,207*
Déficit x Prof	15	7,249*	3,157*	2,879*
Resíduo	46	-	-	-
CV (%)		15,8	18,39	17,67

* Significativo a 5% de probabilidade, ^{ns}: não significativo.

Na primeira avaliação, realizada 30 DAP, observa-se que não havia diferença significativa entre as profundidades de solos para as plantas que estavam sendo irrigadas (N0), assim como também entre os diferentes níveis de déficit hídrico para as profundidades P30 e P40 (Tabela 13). Entretanto, para as profundidades P10 e P20, houve redução significativa na extensão máxima do colmo primário em função do déficit hídrico, sobretudo para a profundidade P10.

Conforme já mencionado, o nível de déficit hídrico não afetou a quantidade de brotação e da emergência das mudas, uma vez iniciados os processos fisiológicos que procedem na emergência do broto. Entretanto, verifica-se que a qualidade da brotação e emergência é afetada, já que o desenvolvimento das plantas é reduzido

significativamente em função do déficit hídrico, sobretudo para as profundidades P10 e P20, que apresentaram menores valores de extensão máxima do colmo primário para as plantas que estavam sob déficit em relação às irrigadas.

Para as avaliações realizadas aos 60 e 90 DAP, observa-se, de maneira geral, que a redução da profundidade do solo e a elevação do nível de déficit hídrico causam redução significativa na extensão máxima do colmo primário (Tabela 14 e 15).

Tabela 13 - Análise de médias da extensão máxima do colmo primário aos 30 DAP em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo

Tratamento	N0	N40	N80	N120	N160	N200
P10	64,02 Aa	45,00 Bb	6,53 Cc	10,29 Cc	7,77 Cc	13,94 Cc
P20	72,17 Aa	61,88 Aab	28,20 Bb	33,10 Bb	30,63 Bb	31,69 Bb
P30	63,71 Aa	69,04 Aa	60,72 Aa	61,38 Aa	73,31 Aa	57,38 Aa
P40	66,61 Aa	69,80 Aa	62,96 Aa	64,87 Aa	65,04 Aa	61,76 Aa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

Tabela 14 - Análise de médias da extensão máxima do colmo primário aos 60 DAP em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo

Tratamento	N0	N40	N80	N120	N160	N200
P10	129,93 Ab	108,20 Aa	37,67 Bc	11,00 Bb	7,77 Bb	13,94 Bc
P20	141,26 Aab	126,83 ABa	100,13 Bb	40,35 Cb	30,65 Cb	35,78 Cbc
P30	149,93 Aab	144,05 Aa	117,67 ABab	114,26 ABa	80,83 BCa	59,51 Cab
P40	172,22 Aa	141,00 ABa	150,38 Aa	104,61 BCa	91,36 Ca	94,73 Ca

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

Tabela 15 - Análise de médias da extensão máxima do colmo primário aos 90 DAP em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo

Tratamento	N0	N40	N80	N120	N160	N200
P10	159,68 Ab	158,73 Aa	73,20 Bc	19,38 Cc	7,77 Cb	13,94 Cb
P20	181,53 Aab	166,25 Aa	135,86 ABb	94,18 Bb	30,65 Cb	35,78 Cb
P30	189,90 Aab	185,33 Aa	151,50 Aab	161,31 Aa	81,50 Ba	59,51 Bab
P40	222,00 Aa	192,53 ABa	182,23 ABa	167,54 Ba	95,16 Ca	94,73 Ca

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

De acordo com Barbosa (2010), plantas que se desenvolvem em menores profundidades de solo têm seu desenvolvimento prejudicado pelo pouco volume de solo explorado pelo sistema radicular, independentemente de ter sido suprida toda a necessidade hídrica da cultura ao longo do desenvolvimento. As plantas cultivadas em

profundidades de solos maiores apresentam condições diferentes de adaptabilidade pelo melhor desempenho do sistema radicular proporcionado pelo maior volume de solo (CAMARGO, 1976).

Após o retorno da irrigação para os níveis de déficit mais acentuados, observou-se que as folhas mais jovens, localizadas próximo ao cartucho, eram as primeiras a retomar o crescimento, enquanto que as folhas mais velhas praticamente não se alteravam, ocorrendo, simultaneamente, a emissão de novas folhas. Begg e Turner (1976) demonstraram que os efeitos causados pelo déficit hídrico nos tecidos mais jovens da planta são maiores que nos tecidos adultos; porém, quando se interrompe o déficit, o desenvolvimento é recuperado somente nas folhas mais jovens.

Para a profundidade P10, observa-se que a partir de 80 mm ET_{0ac} , não houve resposta significativa das plantas ao retorno da irrigação. Para as demais profundidades, observa-se que as plantas retomaram o crescimento após o período de déficit de 120 mm ET_{0ac} , entretanto para P20, este nível de déficit já causou redução na população de plantas, conforme discutido anteriormente.

Além do nível de déficit hídrico de 160 mm ET_{0ac} causar redução na população de plantas para a profundidade P30 e P40, também não foi verificada a retomada do crescimento, mesmo a avaliação sendo realizada 30 dias após o retorno da irrigação, o que indica que a resposta da planta é mais lenta quando atinge níveis elevados de déficit hídrico. Barbosa (2010), conduzindo experimento com cana-de-açúcar em condições semelhantes, também constatou que a extensão máxima do colmo primário é o parâmetro de desenvolvimento mais sensível ao déficit hídrico.

Inman-Bamber e Smith (2005) mencionam que as plantas podem continuar realizando fotossíntese por tempo superior àquele destinado ao crescimento em expansão, pois o estômato responde mais lentamente no início do estresse hídrico que o turgor celular, responsável pelo alongamento de células que causa a expansão foliar.

As Figuras 14, 15 e 16 permitem melhor visualização da retomada do crescimento após o período de déficit hídrico, para as diferentes profundidades de solo estudadas.

Figura 14 - Extensão máxima do colmo primário em função do nível de déficit hídrico para diferentes profundidades de solo

Figura 15 - Desenvolvimento das plantas submetidas a diferentes níveis de déficit hídrico (da esquerda para a direita N0, N40, N80, N120, N160 e N200) cultivadas em solos com profundidade de 10 cm (A), 20 cm (B), 30 cm (C) e 40 cm (D), aos 90 DAP

Figura 16 - Desenvolvimento das plantas cultivadas em diferentes profundidades de solo (da esquerda para a direita P10, P20, P30 e P40) sem déficit hídrico (A) e submetidas a níveis de 40 mm (B), 80 mm (C), 120 mm (D), 160 mm (E) e 200 mm (F) de ET_{0ac} , aos 90 DAP

2.3.3.4 Número de perfilhos

Este parâmetro não apresentou interação significativa entre os fatores níveis de déficit hídrico e profundidade do solo, ou seja, os fatores estudados atuam de forma independente, para todas as avaliações realizadas durante o experimento (Tabela 16).

Tabela 16 - Resumo da análise de variância referente ao número de perfilhos das plantas submetidas a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)

FV	Estatística F			
	GL	30 DAP	60 DAP	90 DAP
Bloco	2	3,727*	2,997 ^{ns}	3,300 ^{ns}
Déficit	5	2,875*	6,597*	12,396*
Prof	3	4,857*	12,673*	19,779*
Déficit x Prof	15	1,247 ^{ns}	1,008 ^{ns}	1,084 ^{ns}
Resíduo	46	-	-	-
CV (%)		27,74	34,97	27,43

* Significativo a 5% de probabilidade, ^{ns}: não significativo.

Ao avaliar os efeitos simples de cada tratamento, observa-se que tanto os níveis de déficit hídrico quanto a profundidade do solo apresentaram influência sobre o número de perfilhos durante a fase inicial de desenvolvimento da cultura (Tabela 17 e 18). De maneira geral, a elevação dos níveis de déficit hídrico e a redução da profundidade do solo causaram redução significativa no número de perfilhos das plantas.

Tabela 17 - Análise de médias do número de perfilhos das plantas em função do nível de déficit hídrico

Tempo	N0	N40	N80	N120	N160	N200
30 DAP	1,56 a	1,50 a	1,25 a	1,28 a	1,15 a	1,37 a
60 DAP	2,54 a	2,23 ab	2,05 abc	1,59 bc	1,28 c	1,50 bc
90 DAP	2,90 a	2,45 ab	2,27 ab	2,06 bc	1,32 d	1,55 cd

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

Tabela 18 - Análise de médias do número de perfilhos das plantas em função da profundidade do solo

Tempo	P10	P20	P30	P40
30 DAP	1,08 b	1,27 ab	1,51 a	1,46 a
60 DAP	1,31 b	1,49 b	2,42 a	2,23 a
90 DAP	1,45 b	1,71 b	2,54 a	2,66 a

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

Na primeira avaliação, aos 30 DAP, não houve diferença significativa no número de perfilhos em função do déficit hídrico, sendo esta constatada a partir dos 60 DAP. Entre os parâmetros analisados, o número de perfilhos apresentou menor sensibilidade ao déficit hídrico. Para níveis de déficit de até 80 mm ET_{0ac} não foi constatada diferença significativa no perfilhamento da planta, entretanto, após o período de déficit de 120 mm ET_{0ac} , houve redução significativa para este parâmetro. Observa-se também que após este nível de déficit hídrico, quando irrigadas, as plantas retomaram o crescimento e continuaram emitindo perfilhos (Figura 17). Entretanto, a partir de 160 mm ET_{0ac} não houve resposta significativa das plantas quanto à emissão de perfilhos.

Quanto à profundidade do solo, observa-se que o número de perfilhos é favorecido com o aumento do volume de solo explorado pelo sistema radicular. De acordo com Casagrande e Vasconcelos (2010), todos os fatores que competem com a

cultura em água e nutrientes podem reduzir o perfilhamento da planta, uma vez que reduzem a água e os nutrientes disponíveis à cultura. Os mesmos autores também aludem que a compactação do solo reduz de forma significativa o perfilhamento da planta, que pode ser atribuído ao menor volume de solo explorado pelo sistema radicular.

Pires et al. (2010) mencionam que a produção da cana-de-açúcar pode ser afetada significativamente quando há redução na emissão e sobrevivência dos perfilhos, sobretudo, quando o déficit hídrico ocorre durante o período de estabelecimento da cultura, o que reduz o número final de colmos. Um perfilhamento vigoroso, no início, é ideal porque proporciona o surgimento de brotos aproximadamente da mesma idade.

Figura 17 - Número de perfilhos da cana-de-açúcar em função do nível de déficit hídrico e da profundidade de solo na fase inicial de desenvolvimento

2.3.3.5 Acúmulo de matéria seca da parte aérea

Para este parâmetro houve efeito significativo da interação entre os níveis de déficit hídrico e a profundidade do solo, tanto para o colmo primário quanto para a touceira (colmo primário + perfilhos) (Tabela 19).

A elevação dos níveis de déficit hídrico e a redução da profundidade do solo causaram redução significativa no acúmulo de matéria seca do colmo primário e da touceira da planta (Tabela 20 e 21). Segundo Santos e Carlesso (1998), em situações de déficit hídrico, a redução no tamanho das folhas individuais, juntamente com a menor produção de folhas, causa redução no incremento do índice de área foliar.

Tabela 19 - Resumo da análise de variância referente ao acúmulo de matéria seca do colmo primário (Colmo) e ao colmo primário + perfilhos (Touceira) submetidos a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)

FV	GL	Estatística F	
		Colmo	Touceira
Bloco	2	0,01 ^{ns}	0,33 ^{ns}
Déficit	5	596,33*	569,39*
Prof	3	226,79*	281,87*
Déficit x Prof	15	19,01*	29,34*
Resíduo	46	-	-
CV (%)		11,15	11,97

* Significativo a 5% de probabilidade, ^{ns}: não significativo.

Tabela 20 - Análise de médias referente ao acúmulo de matéria seca do colmo principal em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo, aos 90 DAP

Tratamento	N0	N40	N80	N120	N160	N200
P10	21,94 Ac	19,87 Ab	3,92 Bd	0,86 Bc	0,36 Bb	0,60 Bb
P20	28,63 Ab	22,86 Bb	14,43 Cc	5,54 Db	1,08 Eb	1,75 DEab
P30	29,94 Ab	28,57 Aa	21,46 Bb	19,96 Ba	3,66 Cab	2,44 Cab
P40	41,83 Aa	29,53 Ba	25,99 Ba	20,98 Ca	4,72 Da	4,48 Da

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

Tabela 21 - Análise de médias referente ao acúmulo de matéria seca da touceira (colmo primário + perfilhos) em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo, aos 90 DAP

Tratamento	N0	N40	N80	N120	N160	N200
P10	22,50 Ad	20,92 Ac	5,20 Bc	0,89 Bc	0,36 Ba	0,62 Ba
P20	30,83 Ac	25,95 Ab	17,07 Bb	5,94 Cb	1,08 Ca	1,75 Ca
P30	45,32 Ab	32,64 Ba	28,69 BCa	25,80 Ca	3,79 Da	2,53 Da
P40	63,43 Aa	34,29 Ba	32,10 Ba	23,40 Ca	4,85 Da	5,34 Da

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

A menor quantidade de matéria seca acumulada na parte aérea em função do déficit hídrico pode ser atribuída à redução na área de interceptação de radiação, provocada pela redução do tamanho das folhas (expansão máxima do colmo primário) e número de perfilhos, na tentativa da planta reduzir a transpiração e manter o teor de água nas células, evitando a paralização dos processos fisiológicos.

A redução de matéria seca proporcionada pela diminuição da profundidade do solo deve-se ao menor volume de solo explorado pelo sistema radicular e aos menores níveis de umidade do solo encontrados nessas profundidades. Esses resultados seguem a ideia descrita por Baran et al. (1974 apud BUSO, 2006), em que os autores explicam que a produção de cana pode ser mais econômica em um solo com média fertilidade, mas com alta disponibilidade de água e que permita o desenvolvimento das raízes em profundidade, do que em um solo com alta fertilidade, mas baixa disponibilidade de água, não promovendo o crescimento do sistema radicular em profundidade, concentrando-o na superfície.

De modo geral, a produção econômica da cultura é dada pela quantidade e qualidade da matéria-prima ao final de todo o ciclo, que é resposta de todos os processos envolvidos no sistema de produção. A fase inicial da cultura já é responsável por determinado potencial de produção, uma vez que a obtenção de maiores produtividades depende de um bom estabelecimento inicial da cultura e do perfilhamento.

Considerando um preparo de solo ideal, em que as plantas encontrariam boas condições químicas e físicas do solo, representadas pelo tratamento de profundidade P40, a variedade RB867515 é muito responsiva à irrigação na fase inicial de desenvolvimento. Uma vez otimizado o fator água, é possível aumentar a utilização dos demais fatores de produção sem maiores riscos e, por consequência, obter maiores produtividades com uma melhor combinação dos insumos empregados.

Durante a fase inicial da cultura o consumo de água é relativamente pequeno em função da reduzida área foliar que contribui com a transpiração. Entretanto, o sistema radicular incipiente não permite a utilização da água de todo o perfil do solo, causando redução significativa no desenvolvimento da planta quando submetida ao déficit hídrico.

Nível de déficit hídrico de 40 mm de $ET0_{ac}$ já causa redução significativa no desenvolvimento da planta, sendo que a partir de 160 mm de $ET0_{ac}$, há grande redução no dossel da cultura e ainda, a pequena população de plantas remanescente não apresenta desenvolvimento satisfatório.

Quando o desenvolvimento da cultura ocorre em cenários desfavoráveis de preparo do solo, observa-se que mesmo mantendo uma boa disponibilidade hídrica, ocorre redução significativa no desenvolvimento das plantas, destacando que a técnica da irrigação não funciona de forma isolada, e sim, deve estar associada com outras práticas de manejo da cultura. Igualmente, nestas condições desfavoráveis, o efeito negativo do déficit hídrico sobre o desenvolvimento da planta é ainda maior.

2.3.4 Sistema Radicular

2.3.4.1 Respostas biométricas e morfológicas do sistema radicular ao déficit hídrico para plantas cultivadas em solos com 40 cm de profundidade

Os valores de matéria seca do sistema radicular indicam que os níveis de déficit hídrico alteram a sua forma de distribuição, assim como também, reduzem a quantidade total de raízes, à medida que se eleva o nível do déficit. Na parte superficial do solo, de 0 a 20 cm, ocorreu uma maior redução do sistema radicular, enquanto que na camada de 20 a 40 cm, a redução não foi significativa ao nível de 5% de probabilidade, conforme apresentado na Tabela 22 e 23.

Tabela 22 - Resumo da análise de variância referente ao sistema radicular das plantas submetidas a três níveis de déficit hídrico (Déficit) para uma profundidade de solo de 40 cm

FV	Estatística F			
	GL	0 – 20 cm	20 – 40 cm	0 – 40 cm
Déficit	2	25.502*	3.434 ^{ns}	22.825*
Resíduo	15	-	-	-
CV (%)		23,80	20,22	18,47

* Significativo a 5% de probabilidade, ^{ns}: não significativo.

Tabela 23 - Análise de médias da matéria seca do sistema radicular das plantas em função do nível de déficit hídrico (g raiz/0,79 dm³ de solo)

Profundidade	N0	N80	N160
0 - 20 cm	0,97 a	0,54 b	0,37 b
20 - 40 cm	0,45 a	0,35 a	0,36 a
0 - 40 cm	1,42 a	0,89 b	0,73 b

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

Os déficits hídricos de 80 e 160 mm de ET_{0ac} provocaram uma redução total de raízes na ordem de 37,87% e 48,86%, respectivamente, em relação às plantas que se desenvolveram sem restrição hídrica. Após o retorno da irrigação nas plantas sob déficit de 80 mm de ET_{0ac} , observou-se um maior desenvolvimento do sistema radicular na camada superficial do solo.

Segundo Vasconcelos e Casagrande (2010), após um período seco, a retomada do crescimento do sistema radicular ocorre pela ramificação a partir das raízes mais velhas que sobreviveram ao ressecamento do solo, ou então, com a formação de novas raízes a partir das gemas dos rizomas e dos novos perfilhos em brotação.

Quanto à distribuição do sistema radicular, as plantas que se desenvolveram sem déficit hídrico apresentaram maior concentração das raízes nos primeiros 20 cm de solo, que foi aproximadamente 68,23% em relação à camada de 20 a 40 cm. Para as plantas que se desenvolveram sob déficit hídrico de 80 e 160 mm de ET_{0ac} , as raízes nos primeiros 20 cm de solo representavam 60,67% e 51,53%, respectivamente (Figuras 18 a 21).

De maneira geral, observa-se um aumento proporcional das raízes subsuperficiais em relação às da superfície à medida que se restringe a disponibilidade hídrica no solo. Contudo, o volume total de raízes é afetado negativamente.

Figura 18 - Desenvolvimento das plantas do tratamento P40 para os níveis de déficit de N0, N80 e N160, respectivamente, utilizadas para visualização do sistema radicular

Figura 19 - Distribuição do sistema radicular para plantas sem restrição hídrica aos 90 DAP

O aumento relativo das raízes subsuperficiais pode ser atribuído ao secamento do solo. Após o plantio, a umidade deste encontrava-se próxima à capacidade de campo para todos os tratamentos. Há, notadamente, o secamento primeiro das camadas superficiais (Figura 22), o que aumenta a resistência à penetração das raízes. Com a manutenção da umidade nas camadas mais profundas, as raízes encontram menor resistência e tendem a manter o crescimento por mais tempo, resultando em um aprofundamento do sistema radicular.

Figura 22 - Variação da água disponível (AD) nas diferentes camadas de solo (0-10, 10-20, 20-30 e 30-40cm) para o tratamento P40 e N200, no período de 08/20/2011 a 01/03/2011

Segundo Vasconcelos e Garcia (2005), em regiões ou períodos secos, a arquitetura radicular apresenta maior proporção de raízes profundas em relação ao total, comparada àquela em locais ou períodos úmidos. Os autores também atribuem

esse aumento relativo das raízes subsuperficiais ao aumento da resistência à penetração das raízes nas camadas superficiais com o secamento do solo, e ainda, mencionam que os metabólitos que seriam utilizados para a formação de raízes superficiais podem ser então utilizados na formação de raízes mais profundas.

2.3.4.2 Estimativa do particionamento de fotoassimilados

O nível de déficit hídrico ocasionou mudança no padrão de crescimento da planta, sendo observado que a relação raiz - parte aérea aumenta quando se estende o período de déficit hídrico, uma vez que a redução na parte aérea é superior à redução do sistema radicular (Tabela 24; Figura 23).

Tabela 24 - Resumo da análise de variância referente à estimativa da matéria seca das raízes, à matéria seca da parte aérea (PA) e à estimativa da relação raiz - parte aérea das plantas submetidas a três níveis de déficit hídrico (Déficit) para uma profundidade de solo de 40 cm

FV	Estatística F			
	GL	Raiz	PA	RA/PA
Déficit	2	16,609*	45,145*	39,283*
Resíduo	6	-	-	-
CV (%)		15,31	22,18	28,38

* Significativo a 5% de probabilidade.

Não foi observada diferença significativa na relação raiz - parte aérea entre as plantas sem restrição hídrica e as que foram submetidas a um déficit de 80 mm de ET_{0ac} (Tabela 25). Após o retorno da irrigação das plantas que estavam sob déficit hídrico de 80 mm de ET_{0ac} , estas retomaram o crescimento, tanto da parte aérea, quanto do sistema radicular.

Tabela 25 - Análise de médias da estimativa da relação raiz - parte aérea das plantas em função do nível de déficit hídrico

Nível déficit	N0	N80	N160
Raiz/PA ($g.g^{-1}$)	0,59 b	0,73 b	3,55 a

Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

Figura 23 - Valores médios de matéria seca da parte aérea e valores médios estimados de matéria seca do sistema radicular para uma unidade experimental (caixa 100 L), em função de diferentes níveis de déficit hídrico. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%, para o mesmo parâmetro analisado

Segundo Dalri (2006), em condições de déficit hídrico, uma das primeiras respostas das plantas é limitar o consumo de água, reduzindo as perdas e diminuindo a taxa de desenvolvimento da área transpiratória, reduzindo não apenas a quantidade total de crescimento, mas também mudando a forma de crescimento.

Quando o nível de déficit hídrico atingiu 160 mm de ET_{0ac} , houve um aumento expressivo da relação raiz - parte aérea, partindo de um valor de 0,59 (sem déficit) para

um valor de 3,55 . Neste período, apenas 33% das plantas estavam vivas e o período que estas tiveram para retomar o crescimento foi relativamente curto. Isto sugere que esses valores de matéria seca das raízes referem-se, principalmente, ao desenvolvimento durante o período de déficit hídrico. Pode-se observar o crescimento preferencial do sistema radicular e uma grande redução da parte aérea. Os carboidratos sintetizados pela planta são utilizados tanto para o desenvolvimento da parte aérea quando para a formação do sistema radicial. Dessa forma, quanto mais energia a planta gastar para a formação e manutenção do sistema radicial, menos ela terá para a formação da biomassa aérea.

O potencial de água do solo atingiu níveis muito baixos por um período relativamente longo, sendo que aproximadamente durante 30 dias, os níveis de umidade do solo permaneceram abaixo do ponto de murcha permanente para o déficit hídrico de 160 mm de ET_{0ac} (Figura 11). O aumento de carboidratos (matéria seca) nas raízes apresenta-se como uma alternativa para a planta manter o gradiente de potencial hídrico necessário à absorção de água, ajustando osmoticamente as raízes.

Para Taiz e Zeiger (2004), o ajuste osmótico é um componente importante das mudanças nos padrões de crescimento das raízes, quando a água é esgotada do solo. Segundo os autores, este ajuste pode ocorrer nos meristemas das raízes, aumentando o turgor e mantendo o crescimento delas.

Oliveira (1985) observou em cana-de-açúcar um maior acúmulo de açúcares redutores em plantas não irrigadas. Tal fato foi atribuído ao aumento na atividade de invertases ácidas e neutras simultaneamente ao abaixamento do potencial hídrico do solo, sugerindo que a quebra da sacarose reduziria o potencial osmótico das células com pequeno investimento energético.

A maior relação raiz - parte aérea também pode ser atribuída aos níveis de ácido abscísico (ABA). Sob condições de desidratação, quando os níveis de ABA estão altos, o hormônio endógeno exerce um forte efeito positivo no crescimento da raiz por suprimir a produção de etileno e um leve efeito negativo no crescimento da parte aérea. O efeito geral é um aumento marcante da razão raiz - parte aérea em baixos potenciais de água, o qual, juntamente com o efeito do ABA no fechamento estomático, auxilia a planta a enfrentar o estresse hídrico (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Lea et al. (1995), conduzindo experimentos com plantas de milho cultivadas em campo e em laboratório, demonstraram que a acumulação de ABA originado nas raízes foi responsável pela restrição do desenvolvimento das folhas e pela manutenção do desenvolvimento do sistema radicular.

2.3.5 Eficiência no uso da água

Os valores de eficiência no uso da água apresentaram interação significativa entre os níveis de déficit hídrico e profundidade do solo (Tabela 26). Os maiores valores de EUA foram observados nas plantas que se desenvolveram sem restrição hídrica (Tabela 27). Resultados semelhantes também foram encontrados por Oliveira et al. (2011) e Farias et al. (2008), os quais concluíram que a irrigação plena proporciona maiores ganhos médios na produtividade de colmo e de açúcar, e maior eficiência de uso da água absorvida. Silva (2009) menciona que os valores de EUA tendem a ser superiores nas áreas com maior disponibilidade de água no solo, logo que as plantas apresentem maior acúmulo de biomassa.

Tabela 26 - Resumo da análise de variância referente à eficiência no uso da água aos 90 DAP, para plantas submetidas a quatro profundidades de solo (Prof) e seis níveis de déficit hídrico (Déficit)

FV	GL	Estatística F
Bloco	2	0,975 ^{ns}
Déficit	5	45,803*
Prof	3	60,362*
Déficit x Prof	15	2,010*
Resíduo	46	-
CV (%)		20,81

* Significativo a 5% de probabilidade, ^{ns}: não significativo.

Tabela 27 - Análise de médias referente à eficiência no uso da água aos 90 DAP, em função do nível de déficit hídrico e da profundidade do solo (g L⁻¹)

Tratamento	N0	N40	N80	N120	N160	N200
P10	1,60 Ac	1,75 Ab	0,76 Bb	0,25 Bc	0,16 Bb	0,43 Bb
P20	2,45 Ab	2,01 Aab	1,99 Aa	1,07 Bb	0,35 Bb	1,09 Bb
P30	2,95 Aab	2,53 Aa	2,25 Aa	2,21 Aa	1,20 Ba	1,14 Bb
P40	3,21 Aa	2,37 Bab	2,36 Ba	2,08 BCa	1,27 Ca	1,97 BCa

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey com um nível nominal de significância (α) de 5%.

O valor máximo de EUA encontrado foi de $3,21 \text{ g L}^{-1}$ para plantas cultivadas em solos com profundidade de 40 cm e sem restrição hídrica. No trabalho desenvolvido por Maschio (2011) em ambiente protegido, a mesma variedade em regime de irrigação plena apresentou valor de $9,71 \text{ g L}^{-1}$, considerando a matéria seca da parte aérea total durante todo o ciclo da cultura.

Os baixos valores de EUA encontrados na fase inicial de desenvolvimento da cultura, mesmo para as plantas sem restrição hídrica, podem ser atribuídos à maior perda de água por evaporação. A incidência da radiação solar diretamente sobre a superfície do solo ocasionava a perda da água para a atmosfera sem que boa parte desta contribuísse para a fixação de biomassa. Isto também explica os menores valores de EUA para as menores profundidades, uma vez que a perda de água por evaporação nas camadas superficiais é maior.

O aumento dos níveis de déficit hídrico também causou redução significativa na extensão máxima da planta e no número de perfilhos. Como resultado, a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura é reduzida (INMAN-BAMBER, 2004). Assim, sob tais condições, onde a possibilidade de estresse hídrico é alta, a cultura da cana-de-açúcar pode apresentar um menor crescimento, resultando numa maior exposição da superfície do solo (SMIT; SINGELS, 2006).

O volume de solo explorado pelo sistema radicular é de fundamental importância para o bom desenvolvimento da planta, tanto pela possibilidade de extrair mais nutrientes, como também pela utilização mais eficiente da água nele contida.

De maneira geral, níveis de déficit hídrico acima de 80 mm de ET_{0ac} também causaram redução significativa nos valores de EUA. Estes resultados podem ser atribuídos, em parte, à mudança no padrão de crescimento da planta. A partir desse nível de déficit hídrico, observou-se que maior parte dos carboidratos sintetizados pela planta foi utilizada para a formação do sistema radicial, sendo observada grande redução da parte aérea. Para Inman-Bamber e Smith (2005), a eficiência de utilização de água da cana-de-açúcar está relacionada a fatores fisiológicos e morfológicos, tais como condutância estomática, partição de fotoassimilados, índice de área foliar; alongação dos colmos e partição de matéria seca.

De acordo com Silva (2009), sob condições de disponibilidade de água e nutrientes no solo, a cana-de-açúcar produz uma grande quantidade de biomassa. No entanto, quando cultivada em condições de estresse hídrico durante as fases críticas (estabelecimento da cultura e início da elongação de colmos), pode apresentar reduções expressivas no acúmulo de biomassa total, biomassa dos colmos e de sacarose, e consequentemente apresentar redução nos valores de EUA.

3 CONCLUSÕES

Nas condições em que o presente estudo foi desenvolvido para a cultura da cana-de-açúcar na fase inicial de desenvolvimento e a partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Estando a umidade do solo na capacidade de campo no momento de plantio das mudas de cana, a imposição de um período de déficit hídrico não altera, em termos quantitativos, a brotação e emergência das mudas. Em condições de preparo de solo desfavoráveis (profundidade radicular máxima entre 10 e 20 cm), o déficit hídrico altera negativamente a qualidade da brotação e emergência das mudas;
- A variedade RB867515 é muito responsiva à irrigação, sendo que nível de déficit hídrico de 40 mm de ET_{0ac} já é suficiente para reduzir, de forma significativa, o desenvolvimento da planta, independente das profundidades de solo analisadas;
- Para profundidades de solo a partir de 20 cm, níveis de déficit hídrico acima de 120 mm de ET_{0ac} são considerados críticos, uma vez que causam grande redução na população de plantas;
- Para profundidades de solo de 10 e 20 cm, nível de déficit hídrico de 160 mm de ET_{0ac} provoca a morte total das plantas, enquanto que para profundidades de 30 e 40 cm, isto ocorre com nível de 200 mm de ET_{0ac} ;
- O parâmetro de desenvolvimento mais sensível ao déficit hídrico é a extensão máxima do colmo primário, enquanto que o número de perfilhos apresenta-se como o parâmetro menos sensível;
- A elevação dos níveis de déficit hídrico, além de reduzir de forma significativa a quantidade total de raízes, causa aumento proporcional das raízes subsuperficiais devido às camadas de solo mais profundas manterem, por um maior tempo, teores de umidade favoráveis ao desenvolvimento das raízes;
- O déficit hídrico causa maior redução de crescimento na parte aérea da planta quando comparado com o sistema radicular, proporcionando aumento significativo na relação raiz - parte aérea a partir de 160 mm de ET_{0ac} ;

- A eficiência no uso da água durante a fase inicial de desenvolvimento da cultura para uma profundidade de solo de 40 cm sem restrição hídrica foi de $3,21 \text{ g L}^{-1}$, valor este abaixo dos valores encontrados na literatura para todo o ciclo da planta;
- O déficit hídrico e a redução da profundidade do solo explorada pelo sistema radicular causam redução significativa nos valores de eficiência no uso da água, que variaram de 0,16 a $3,21 \text{ g L}^{-1}$.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, D. **Crop evapotranspiration**: Guides for computing crop water requirements Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO; Rome, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BARAN, R.; BASSEREAU, D.; GILLET, N. Measurement of available water and root development on an irrigated sugar cane crop in the Ivory Coast. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974, Durban. **Proceedings**... Durban: Hayne & Gibson, 1974. v. 2. p.726-735.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N.A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: PLANALSUCAR - Coordenadoria Regional Sul – COSUL. **Climatologia**, Araras, SP. n.1, p. 1-22, 1977.
- BARBOSA, F.S. **Resistência à seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo**. 2010. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências: Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- BEAUCLAIR, E.G.F. de; SCARPARI, M.S. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. Piracicaba: T.C.C. Ripoli, 2007. p. 65-73.
- BEGG, J.E.; TURNER, N.C. Crop water deficits. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.28, p.161-217, 1976.
- BLACKBURN, F. **Sugar-cane**. New York:Longman, 1984. 414p.
- BOS, M.G.; MURRAY-RUST, D.H.; MERREY, D.J.; JOHNSON, H.G.; SNELLEN, W.B. Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. **Irrigation and Drainage Systems**, New York, v. 5, p.231–261, 1994.
- BOVI, V. **Influência do período de armazenamento de mudas de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) na brotação e produção das touceiras**. 1982. 80 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.
- BRIEGER, F.O.; PARANHOS, S.B. Técnica Cultural. In: MALAVOLTA, E.; SEGALLA, A.L.; GOMES, F.P.; BRIEGER, F.O.; PARANHOS, S.B.; RANZANI, G.; VALSECHI, O.; JUNQUEIRA, A.A.B.; CAMARGO, A.P.; BERGAMIN, J.; TOFFANO, W.B.; PEIXOTO, A.M.; LIMA, U.A.; DANTAS, B.; ORTOLANI, A.A.; HAAG, H.P.; LIMA, C.C.A.; OLIVEIRA, E.R.. **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro da Potassa, 1964. p.139-190.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 205-218.

BUSO, P.H.M. **Estudo do sistema radicial de cana-de-açúcar no plantio em gema e tolete**. 2006. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

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

CAMARGO, P.N. **Fisiologia de la caña de azúcar**. México: Comisión Nacional de la Industria Azucarera, 1976. 59 p. (Serie Divulgación Técnica IMPA Folleto, 6).

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

CASAGRANDE, A.A.; VASCONCELOS, A.C.M de; Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 57-78.

CHAPOLA, R.G.; HOFFMANN, H.P.; BASSINELLO, A.I.; FERNANDES JUNIOR, A.R.; BRUGNARO, C; ROSA, J.R.B.F.; VIEIRA, M.A.S.; SCHIAVINATO, S.R. Censo varietal de cana-de-açúcar de 2009 dos estados de São Paulo, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. **STAB - Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 28, n. 4, p. 34-37, 2010.

CHAVES, S.W.P. **Efeito da alta frequência de irrigação e do “mulching” plástico na produção da pimenta ‘Tabasco’ fertirrigada por gotejamento**. 2008. 153p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

CHRISTOFFOLETI, P.J. **Aspectos fisiológicos da brotação, perfilhamento e florescimento da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 80 p. (mimeografado).

CLEMENTS, H.F. Factors affecting the germination of sugarcane. **Hawaiian Planters’ Record**, Honolulu, n. 44, p. 117-146, 1940.

COELHO, R.D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no brasil**. 2007. 192 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, maio/2011**. Brasília, 2011. 19 p.

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MARIN, F.R. Efeito de variáveis meteorológicas sobre a evapotranspiração de referência em uma região de clima tropical úmido do Brasil. In: REUNIÓN ARGENTINA Y LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA; 10;4., 2004. Mar del Plata, **Anais...** Mar del Plata: Asociación Argentina de Agrometeorologia, 2004. 27 p.

COSTA, C.T.S. **Crescimento, pigmentos fotossintéticos e produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), no quarto ciclo de cultivo**. 2009. 51 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) - Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2009.

DALRI, A.B. Irrigação em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J.C.M. (Ed.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 157-170.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.516-524, 2008.

DETAR, W.R. Yield and growth characteristics for cotton under various irrigation regimes on sandy soil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 69-76, 2008.

DILLEWIJN, C.Van. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 197 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

FARIAS, C.H. de A.; FERNANDES, P.D.; DANTAS NETO, J.; GHEYI, H.R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.494-506, 2008.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Anuário estatístico da agricultura**. São Paulo, 2011. p. 220-222.

FUGIWARA, M.; KURACHI, S.A.H.; ARRUDA, F.B.; PIRES, R.C.M.; SAKAI, E. **A técnica de estudo de raízes pelo método do trado**. Campinas: Instituto Agrônomo. 1994. 9p. (Boletim Técnico, 153).

GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEARE, I.D.; PEET, M.M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GAVA, G.J. de C.; SILVA, M. de A.; SILVA, R.C. da; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KOLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

GENUCHTEN, M.Th.van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

IGBADUN, H.E.; MAHOO, H.F.; TARIMO, ANDREW K.P.R.; BAANDA A.S. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 85, p.141-150, 2006.

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

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

KAHLLOWN, M.A.; RAOOF, A.; ZUBAIR, M.; KEMPER, W.D. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 87, p. 292-298, 2007.

KARAM, F.; LAHOUD, R.; MASAAD, R.; KABALAN, R.; BREIDI, J.; CHALITA, C.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, p. 213-223, 2007.

KINGSTON, G. Benchmarking yield of sugarcane from estimates of water use. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, Brisbane, v. 16, p. 201-209, 1994.

KORNDÖRFER, G.H.; PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. **Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA**. Piracicaba: Cooperpucar, 1989, n.47, p.32-36. (Boletim Técnico 47).

KRAMER, P.J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 1983. 489p.

LEA, P.J.; AL-SULAIT, A.; PALMER, S.; DAVIE, W.J. Absorção e metabolismo de nitrogênio sobre estresse hídrico. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTRESSE AMBIENTAL: O MILHO EM PERSPECTIVA, 1995. Belo Horizonte, MG. **Anais...** EMBRAPA/CNPMS, 1995. v.1, p.163-194, 1995.

LINDERSON, M-L.; ZINAIDA IRITZ, Z.; LINDROTH, A. The effect of water availability on stand-level productivity, transpiration, water use efficiency and radiation use efficiency of field-grown willow clones. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 31, p.460-468, 2007.

LUCCHESI, A.A. Fatores da produção vegetal. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. 1987. p. 1-11.

LUCCHESI, A. A. Cana-de-açúcar. In: CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A.; SESTARI, I. **Manual de fisiologia vegetal: fisiologia de cultivos**. Piracicaba: CERES, 2008. p. 58-76.

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

MARQUES, P.A.A.; MARQUES, T.A.; FRIZZONE, J.A. Viabilidade econômica sob condições de risco para a irrigação da cana-de-açúcar na região de Piracicaba - SP. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p.55-65, 2006.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87p. Dissertação (Mestrado em Ciências: Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2011.

MATIOLI, C.S. **Irrigação suplementar de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) ciclo cana soca: um modelo de análise de decisão para o Estado de São Paulo**. 1998. 98p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

MOLDEN, D.J.; SAKTHIVADIVEL, R.; PERRY, C.J.; FRAITURE, C.; KLOEZEN, W.H. **Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems**. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1998. 34 p.

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

OLIVEIRA, L.E.M. **Comportamento fisiológico de plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum sp*) sob condições de deficiência hídrica: Alterações da assimilação do nitrato e mobilização de açúcares**. 1985. 126p. Tese (Doutorado em Ciências: Fisiologia Vegetal) - Universidade de Campinas, Campinas, 1985.

OLIVEIRA, M.L.; RUIZ, H.A; COSTA, L.M.; SCHAEFER, E.G.R. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.535-539, 2005.

ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M.B.P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T.(Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. 1987. p.71-100.

PERRY, C.J. **Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems**. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1996. 27p.

PLANA, R.; DOMINI, M. E.; ESPINOSA, R. Influencia de lãs precipitaciones y la temperatura sobre la brotadura de dos variedades de caña de azúcar (*Saccharum* sp híbrido) plantadas em diferentes meses. **Cultivos tropicales**, Habana, v.9, n.3, p. 19-24, 1987.

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

PIRES, R.C.M.; ARRUDA, F.B; SAKAI, E. Irrigação e Drenagem. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 631-670.

PRADO, H. do. **Pedologia fácil**: aplicações na agricultura. 2. ed. Piracicaba: H. do Prado, 2008. 145 p.

PRADO, H. do. **Pedologia fácil**: aplicações. 3. ed. Piracicaba: H. do Prado, 2011. 180 p.

PRADO, H. do; PÁDUA-JUNIOR, A.L.; GARCIA, J.C.; MORAES, J.F.L. de; CARVALHO, J.P. de; DONZELI, P.L. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 179-205.

R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p. 237-239. (Boletim Técnico, 100).

ROSENFELD, U. **Determinação do período crítico de deficiência hídrica para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.)**. 1989. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

ROSOLEM, C.A. Interpretação de análise de solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO SOBRE TECNOLOGIAS DE MANEJO DO SOLO E ADUBAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1., 1994. Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SOPRAL SUCRESP/ALCOPLAN. 1994. p. 53-73.

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

SCARDUA, R. **O clima e a irrigação na produção agroindustrial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 1985. 122 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E. NÓBREGA, J.C.M. (Ed.) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.

SEGOVIA, A. Efecto del tamaño y posición del esqueje em la germinación de la caña de azúcar. **Revista de la Facultad Agronomia de la Universidad Central de Venezuela**, Maracay, v.7, n.4, p. 21-35, 1974.

SILVA, M.A.; CARLIN, S.D.; PERECIN, D. Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, n. 296, p. 457-466, 2004.

SILVA, T.G.F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no submédio do vale do São Francisco**. 2009. 176 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009.

SIMÕES NETO, D.E. **Efeitos da quantidade de reserva energética do tolete e da compactação do solo no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1986. 94p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1986.

SINGH, S.; SRIVASTAVA, K. K. Effects of soil - water potential on germination of sugar cane setts. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, New Delhi, v. 44, n. 3, p. 184-187, 1973.

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

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

SOARES, R.A.B.; CARDOSO, H.R. Irrigação de salvamento em cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; FERNANDES, C.; PINTO, A.S. (Ed.). **Expansão e renovação de canavial**. Piracicaba: CP 2, 2007. p. 281-293.

SOARES, R.A.B.; OLIVEIRA, P.F.M.; CARDOSO, H.R.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A.; ROSENFELD, U. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, n.4, p. 38-41, 2004.

STOLF, R. Metodologia de avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 4, n. 6, p. 22-36, 1986.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 3rd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2002. 690p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Tradução de E. R. Santarém et al. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

VASCONCELOS, A.C.M de. O sistema radicular da cana-de-açúcar e a expressão do potencial de produção. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.21, n. 2, p.20, 2002.

VASCONCELOS, A.C.M de; CASAGRANDE, A.A.; Fisiologia do sistema radicular. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-Açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 79-98.

VASCONCELOS, A.C.M. de; GARCIA, J.C. **Cana-de-açúcar: Ambientes de Produção**. Desenvolvimento Radicular da cana-de-açúcar. Ribeirão Preto: IAC/Apta, 2005. 5 p. (Encarte Técnico, 110).

VASCONCELOS, A.C. M de; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v. 27, n. 5, p. 849-858. 2003 Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000500009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 11 out. 2011.

WHITEMAN, P.C.; BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. The physiology of sugarcane; effects of temperature, light, and water on set germination and early growth (*Saccharum* spp.). **Australian Journal of Biological Science**, East Melbourne, v.16, n.2, p. 415-428, 1963.

ANEXOS

ANEXO A - Dados de radiação solar global - R_s ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$); temperatura mínima, máxima e média - $T_{\min}$, $T_{\max}$, T_{med} ($^{\circ}\text{C}$); umidade relativa mínima, máxima e média - $UR_{\min}$, $UR_{\max}$, UR_{med} (%); déficit de pressão de vapor - DPV (kPa); e evapotranspiração de referência - ET_0 (mm dia^{-1}) do interior da estufa em cada dia Juliano (J)

(continua)

DATA	J	R_s	$T_{\min}$	$T_{\max}$	T_{med}	$UR_{\min}$	$UR_{\max}$	UR_{med}	DPV	ET_0
8/2	39	16,02	21,70	39,27	29,65	31,97	92,60	64,17	2,51	4,01
9/2	40	14,54	22,35	39,85	29,68	29,16	91,90	63,85	2,70	3,81
10/2	41	13,67	22,11	38,27	28,71	33,83	91,80	68,37	2,33	3,56
11/2	42	15,45	22,51	39,42	29,23	34,46	92,10	68,36	2,45	3,91
12/2	43	16,31	21,69	40,66	28,97	29,75	91,20	66,90	2,80	4,12
13/2	44	13,30	22,39	37,21	28,30	37,04	93,90	72,08	2,08	3,42
14/2	45	10,28	22,71	38,59	27,01	38,91	93,20	78,08	2,18	2,96
15/2	46	9,15	23,13	35,94	26,48	46,14	92,20	79,00	1,71	2,61
16/2	47	11,61	22,42	39,41	27,57	35,12	93,40	74,47	2,41	3,24
17/2	48	12,94	21,44	38,39	27,32	36,70	93,80	73,99	2,22	3,39
18/2	49	14,30	20,20	39,89	26,84	34,53	94,10	74,75	2,47	3,68
19/2	50	14,70	20,64	39,60	27,85	30,48	94,00	70,14	2,58	3,76
20/2	51	14,49	21,26	40,79	28,77	31,26	93,00	67,93	2,73	3,79
21/2	52	14,94	21,25	41,70	28,98	25,33	93,00	65,44	3,10	3,93
22/2	53	15,64	21,98	37,98	29,63	34,73	93,10	63,98	2,25	3,84
23/2	54	13,32	21,95	37,34	28,00	38,98	92,90	73,44	2,04	3,39
24/2	55	12,45	22,30	39,31	28,58	32,86	93,60	73,32	2,47	3,37
25/2	56	12,16	23,10	38,90	29,20	35,00	93,00	72,99	2,36	3,30
26/2	57	13,59	22,40	41,01	29,55	34,50	92,90	69,63	2,64	3,63
27/2	58	10,17	22,67	38,57	27,26	44,75	92,30	78,54	1,99	2,86
28/2	59	3,54	22,16	31,02	24,63	65,33	92,10	85,58	0,89	1,35
1/3	60	4,48	21,08	31,63	23,95	53,70	92,90	85,30	1,17	1,63
2/3	61	4,67	20,82	26,29	23,31	76,97	93,50	86,74	0,47	1,38
3/3	62	4,98	20,33	26,46	22,56	69,58	93,60	86,96	0,60	1,48
4/3	63	4,78	20,36	26,98	22,72	70,39	93,60	86,62	0,69	1,49
5/3	64	4,98	20,89	25,91	22,26	71,21	92,80	87,21	0,57	1,46
6/3	65	8,50	19,90	32,15	24,39	52,77	92,40	77,87	1,22	2,27
7/3	66	6,39	20,22	30,16	23,43	60,06	92,70	82,36	0,94	1,83
8/3	67	6,39	20,31	31,09	24,35	58,34	92,00	79,94	1,04	1,87
9/3	68	9,27	19,93	35,71	26,62	46,60	94,20	73,60	1,63	2,55
10/3	69	14,26	19,97	38,21	27,80	35,70	94,70	70,51	2,22	3,51
11/3	70	11,16	22,15	37,43	27,80	38,36	92,90	73,76	2,07	2,99
12/3	71	5,69	22,83	31,94	25,60	56,99	94,50	84,75	1,10	1,78
13/3	72	11,28	22,13	36,26	27,51	42,20	95,10	74,91	1,81	2,93
14/3	73	9,25	21,40	37,78	27,01	37,32	95,00	75,26	2,12	2,69
15/3	74	9,40	21,46	34,87	26,18	46,29	92,70	73,03	1,59	2,54
16/3	75	10,58	20,65	32,90	24,91	45,06	87,50	71,48	1,53	2,66
17/3	76	10,07	20,10	37,37	27,03	40,72	92,60	71,21	1,98	2,76
18/3	77	6,12	22,46	37,26	26,45	46,88	94,50	82,58	1,77	2,07
19/3	78	4,27	21,03	27,85	24,17	70,97	94,00	83,73	0,62	1,36
20/3	79	12,18	20,78	31,19	24,60	52,26	89,80	74,15	1,21	2,78
21/3	80	11,15	19,33	37,32	25,93	34,39	94,80	73,09	2,15	2,94
22/3	81	4,63	21,23	30,32	24,13	60,86	93,70	83,35	0,93	1,53
23/3	82	7,40	20,95	32,41	25,74	51,44	94,20	78,62	1,25	2,08

ANEXO A - Dados de radiação solar global - R_s ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$); temperatura mínima, máxima e média - $T_{\min}$, $T_{\max}$, T_{med} ($^{\circ}\text{C}$); umidade relativa mínima, máxima e média - $UR_{\min}$, $UR_{\max}$, UR_{med} (%); déficit de pressão de vapor - DPV (kPa); e evapotranspiração de referência - ET_0 (mm dia^{-1}) do interior da estufa em cada dia Juliano (J)

(continuação)										
DATA	J	R_s	$T_{\min}$	$T_{\max}$	T_{med}	$UR_{\min}$	$UR_{\max}$	UR_{med}	DPV	ET_0
24/3	83	12,06	22,05	35,48	27,24	40,40	94,30	74,96	1,80	2,98
25/3	84	12,80	21,37	37,78	28,41	34,84	94,00	71,45	2,21	3,21
26/3	85	11,64	21,24	39,46	28,41	32,64	94,60	73,42	2,48	3,11
27/3	86	11,42	22,59	38,33	29,18	36,38	94,30	72,62	2,22	3,01
28/3	87	9,90	22,82	37,76	29,03	38,19	93,85	72,59	2,11	2,74
29/3	88	7,65	22,82	38,25	26,97	39,99	93,40	79,93	2,11	2,39
30/3	89	8,64	21,69	33,62	25,47	52,79	93,60	76,94	1,31	2,27
31/3	90	9,43	20,57	35,72	26,32	43,41	92,10	71,94	1,75	2,53
1/4	91	12,73	19,20	38,19	27,21	35,35	93,80	69,17	2,23	3,14
2/4	92	8,36	20,18	36,12	26,07	48,47	94,20	77,60	1,61	2,32
3/4	93	2,70	22,22	28,82	24,58	72,81	92,60	86,78	0,64	1,09
4/4	94	6,50	21,54	31,68	24,78	56,51	94,50	83,93	1,09	1,84
5/4	95	6,86	19,80	34,15	24,63	45,11	95,70	82,50	1,52	2,05
6/4	96	12,40	17,19	35,47	24,99	28,26	96,20	70,22	2,11	2,94
7/4	97	10,58	17,27	36,40	24,69	32,95	95,00	71,54	2,09	2,72
8/4	98	11,58	16,93	34,29	24,74	34,04	94,20	70,33	1,84	2,75
9/4	99	9,49	17,37	35,11	24,41	32,24	95,30	71,38	1,96	2,52
10/4	100	8,52	16,38	32,73	22,26	42,32	94,30	78,91	1,48	2,22
11/4	101	10,61	17,49	33,41	24,53	46,13	95,70	77,18	1,43	2,50
12/4	102	9,31	20,16	34,81	25,28	43,15	94,60	77,98	1,65	2,41
13/4	103	4,57	19,91	29,17	22,59	62,98	94,50	85,78	0,81	1,43
14/4	104	11,40	17,60	38,94	26,20	35,68	95,50	74,02	2,29	2,89
15/4	105	9,30	19,85	37,94	26,56	40,83	95,60	78,40	2,00	2,53
16/4	106	10,69	21,04	36,89	27,03	36,00	95,10	76,28	2,06	2,71
17/4	107	11,17	21,17	38,42	27,60	33,43	94,70	72,80	2,32	2,86
18/4	108	10,50	20,44	38,51	27,01	34,06	94,40	73,91	2,31	2,75
19/4	109	8,12	20,32	36,26	26,10	39,53	95,00	74,11	1,88	2,29
20/4	110	10,06	18,65	36,43	25,88	33,41	94,50	73,26	2,08	2,58
21/4	111	10,67	19,36	36,10	26,10	33,69	93,10	71,76	2,06	2,64
22/4	112	10,87	19,23	37,61	26,45	29,59	94,60	71,33	2,34	2,74
23/4	113	10,54	18,87	37,57	26,61	31,92	94,20	71,41	2,27	2,68
24/4	114	8,42	19,66	35,49	25,06	40,26	93,10	74,19	1,80	2,28
25/4	115	7,10	19,23	32,47	24,30	48,98	92,90	74,50	1,32	1,93
26/4	116	6,04	19,79	28,74	22,50	49,12	89,00	73,20	1,13	1,71
27/4	117	3,08	17,36	30,49	19,85	37,47	94,60	81,45	1,42	1,51
28/4	118	4,28	15,77	26,79	19,47	65,40	94,70	85,96	0,66	1,28
29/4	119	9,13	15,95	34,35	22,90	39,85	96,60	78,47	1,83	2,31
30/4	120	9,29	16,74	34,10	22,92	26,94	96,10	75,42	1,99	2,36
1/5	121	3,51	17,97	29,74	21,11	56,49	95,60	85,91	0,95	1,32

ANEXO A - Dados de radiação solar global - R_s ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$); temperatura mínima, máxima e média - $T_{\min}$, $T_{\max}$, T_{med} ($^{\circ}\text{C}$); umidade relativa mínima, máxima e média - $UR_{\min}$, $UR_{\max}$, UR_{med} (%); déficit de pressão de vapor - DPV (kPa); e evapotranspiração de referência - ET_0 (mm dia^{-1}) do interior da estufa em cada dia Juliano (J)

(conclusão)										
DATA	J	R_s	$T_{\min}$	$T_{\max}$	T_{med}	$UR_{\min}$	$UR_{\max}$	UR_{med}	DPV	ET_0
2/5	122	3,70	15,23	26,50	20,51	62,34	95,50	87,04	0,69	1,23
3/5	123	9,56	12,08	31,08	19,92	38,00	96,70	74,09	1,42	2,14
4/5	124	10,07	11,61	33,13	20,17	35,77	96,80	74,40	1,09	2,13
5/5	125	9,49	13,45	33,26	21,08	31,53	96,50	76,10	1,77	2,26
6/5	126	9,19	15,08	35,07	23,01	31,05	96,10	72,60	1,98	2,31
7/5	127	9,41	15,44	34,84	23,09	33,92	96,30	72,80	1,87	2,30
8/5	128	8,83	14,85	33,74	22,51	34,04	95,90	74,61	1,76	2,19
9/5	129	8,54	15,28	34,03	22,95	36,00	96,00	74,22	0,66	1,86