



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA DE IRRIGAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR

SAMUEL SILVA

**CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba – Brasil
Fevereiro – 2015**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA DE
IRRIGAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR**

ORIENTADOR

Prof. Dr. José Dantas Neto

Co-orientador

Prof. Dr. Iêdo Teodoro

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem. Linha de pesquisa: Engenharia de Irrigação e Drenagem.

CAMPINA GRANDE
Estado da Paraíba – Brasil
Fevereiro – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S546e Silva, Samuel.
Evapotranspiração e análise econômica de irrigação em cana-de-açúcar /
Samuel Silva. – Campina Grande, 2015.
56 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2015.

"Orientação: Prof. Dr. José Dantas Neto, Prof. Dr. Iêdo Teodoro".
Referências.

1. Gotejamento. 2. Evapotranspiração Real. 3. Produtividade Agroindustrial.
I. Dantas Neto, José Dantas. II. Teodoro, Iêdo. III. Título.

CDU 631.674.6(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

SAMUEL SILVA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA DE IRRIGAÇÃO EM
CANA-DE-AÇÚCAR**

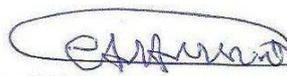
BANCA EXAMINADORA

PARECER



Dr. José Dantas Neto
Orientador - UAEA/UFCG

APROVADO



Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo
Examinador - UAEA/UFCG

APROVADO



Dr. João Teodoro
Examinador - UFAL

APROVADO

FEVEREIRO - 2015

A Deus

A meus pais

Mauro Pedro da Silva

e

Nilsa Maria da Conceição Silva

A minha esposa

Abilene Tenório do Nascimento Tenório Silva

Dedico!

Aos meus orientadores:

Prof. Dr. José Dantas Neto

e

Prof. Dr. Iêdo Teodoro

Ofereço!

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. José Dantas Neto, pela paciência com a qual me tem ensinado, e pela amizade, respeito, confiança, dedicação e estímulo nos momentos difíceis;

Ao professor Dr. Iêdo Teodoro, pela amizade, ensinamentos e ajuda neste trabalho;

Ao professor Dr. Carlos Azevedo, por ter aceitado o convite para fazer parte da banca examinadora e pelas instruções e sugestões neste trabalho;

Aos colegas de laboratório da UFCG: Silvanete, Patrícia, Betânia, Aaron e Arsênio, pela convivência e amizade;

Aos colegas de laboratório da UFAL e amigos: Alan Ferreira, Artur Vinícius, Arthur Cantarelli, Augusto César, Marcelo Augusto, Marcos Liodorio e Ricardo Barbosa, pela inestimável contribuição na condução do experimento;

A todos os meus amigos de turma, pela amizade, companheirismo e momentos compartilhados;

Ao corpo docente do curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFCG, pela contribuição na minha formação profissional;

À NETAFIN, pela estrutura básica do sistema de irrigação;

Ao Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS), por me disponibilizar os dados meteorológicos;

Ao Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA-UFAL), pela variedade e cana-semente utilizadas neste trabalho;

À D. Nísia Leão, pela correção gramatical;

À CAPES, pela fomentação da bolsa de mestrado;

A todos os que acreditaram em mim e me ajudaram, de forma direta e indireta, a concluir este trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

SUMÁRIO

	Pg.
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. GERAL	12
2.2. ESPECÍFICOS.....	12
3. REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1. A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	13
3.2. RELAÇÃO ÁGUA-SOLO-PLANTA-ATMOSFERA.....	16
3.3. ÍNDICE DE SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ÁGUA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO RELATIVA	17
3.4. IRRIGAÇÃO NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR	18
3.5. PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA E AGROINDUSTRIAL	19
3.6. FUNÇÃO DE PRODUÇÃO	19
3.7. RENDIMENTO ÓTIMO ECONÔMICO DE CULTURAS AGRÍCOLAS	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. LOCALIZAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	22
4.2. VARIÁVEIS AGROMETEOROLÓGICAS	24
4.3. ÍNDICE DE SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ÁGUA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO RELATIVA.....	31
4.4. VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO	31
4.5. FUNÇÃO DE RESPOSTA	32
4.6. PRODUTIVIDADE DE MÁXIMA EFICIÊNCIA ECONÔMICA.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1. VARIÁVEIS AGROMETEOROLÓGICAS	36
5.2. PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR	44
6. CONCLUSÕES.....	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Faixa territorial de cultivo da cana-de-açúcar e região de origem destacado em vermelho.	13
Figura 2. Fases do ciclo de produção da cana-de-açúcar.	14
Figura 3. Mapa da área canavieira de Alagoas e imagem obtida no Google Maps do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, localizado no município de Rio Largo, destacando a estação meteorológica (quadro com borda amarela) e a área destinada ao experimento (quadro com borda vermelha tracejada).	22
Figura 4. Croqui do experimento.	23
Figura 5. Detalhes do espaçamento entre linhas da cultura da cana-de-açúcar e da fita gotejadora.	24
Figura 6. A: Valores diários de chuva, evapotranspiração de referência (ET_0); B: lâminas de irrigação (L0, L1, L2, L3, L4, L5 e L6), durante três ciclos de cultivo da cana-de-açúcar no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2012, na região de Rio Largo-AL.	36
Figura 7. Valores diários da capacidade de água disponível (CAD), limite da água facilmente disponível (AFD) e armazenamento de água no solo (ARM) para tratamentos com diferentes lâminas de irrigação (L0, L1, L2, L3, L4, L5 e L6) em cultivos da cana-de-açúcar nos anos de 2009 (A), 2010 (B) e 2011 (C), na região de Rio Largo-AL.	38
Figura 8. Valores diários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e evapotranspiração real da cana-de-açúcar (ET_r) para tratamentos com diferentes lâminas de irrigação (L0, L1, L2, L3, L4, L5 e L6) nas safras de 2009/2010 (A), 2010/2011 (B) e 2011/2012 (C), na região de Rio Largo-AL.	39
Figura 9. Produtividade agrícola (TCH) e produtividade agroindustrial (ATR) nas safras 2009/10 (A), 2010/11 (B) e 2011/12 (C); e margem de contribuição agrícola (MCA) em função de lâminas de irrigação na cana-de-açúcar nas safras 2009/10 (D), 2010/11 (E) e 2011/12 (F), na região de Rio Largo-AL.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físicas do solo e classificação realizada por Carvalho (2003).	23
Tabela 2. Valores do K_{cb} da cana-de-açúcar tabelados por Allen et al. (1998).	26
Tabela 3. Valores de f_c adaptados por Silva et al. (2012a) para serem utilizados no ciclo de produção da cana-de-açúcar.	28
Tabela 4. Custo do milímetro de água para irrigação por gotejamento, custos com plantio, tratos culturais, corte, carregamento e transporte (CCT) e preço dos açúcares totais recuperáveis (ATR).	34
Tabela 5. Valores totais de chuva efetiva (P_{efet}), irrigação, P_{efet} mais irrigação, evapotranspiração real da cultura (ET_r), evapotranspiração relativa (ER), produtividade de colmos (TCH) e açúcares totais recuperáveis (ATR) para os tratamentos nas safras de 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012, na região de Rio Largo-AL.	42
Tabela 6. Modelos matemáticos para estimativa da produtividade de colmos (TCH) e de açúcares totais recuperáveis (ATR) da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação (L) na cana-planta (safra 2009/2010), 1ª soca (safra 2010/2011) e 2ª soca (safra 2011/2012) na região de Rio Largo-AL.	44

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA DE IRRIGAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

O uso da irrigação nos canaviais requer bastante atenção, visto que o agricultor deve utilizar a quantidade do insumo que proporcione o máximo retorno econômico. Por isso, para otimizar o uso da água na irrigação da cana-de-açúcar, este trabalho teve como objetivo analisar os níveis desse recurso que proporcionassem produtividades economicamente viáveis ao longo das socarias. O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias (CECA/UFAL) em Rio Largo-AL, utilizando-se a variedade RB92579 irrigada por gotejamento com sete lâminas de irrigação (níveis de 0, 25, 50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração de referência- ET_0 média diária do período seco), em três ciclos de produção de cana-de-açúcar entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2012. A evapotranspiração da cultura (ET_c) e a evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar foram estimadas pela metodologia de K_c duplo, o qual separa os efeitos de transpiração da planta e evaporação direta da água do solo. Foram calculados o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) para o tratamento de sequeiro e a evapotranspiração relativa da cultura (ER) para todos os tratamentos. A produtividade agrícola e agroindustrial da cultura foi utilizada para o ajuste de curvas de respostas às lâminas de irrigação. A ET_r média na fase de crescimento máximo dos três ciclos variou de 1,73 a 5,04 mm dia⁻¹ nos tratamentos com 0 e 150% da ET_0 , respectivamente. A cana-de-açúcar irrigada com K_c máximo de 1,5 (150% da ET_0) no primeiro, segundo e terceiro ciclos de cultivo, produziu em média 48,0 Mg ha⁻¹ a mais do que a cana cultivada sem irrigação. Para o valor médio de 0,55 R\$ kg⁻¹ de açúcares totais recuperáveis (ATR), a lâmina de máxima eficiência econômica foi 666 (85% da ET_0), 290 (65% da ET_0) e 397 mm (70% da ET_0), com lucro de 3.272,07; 2.456,90 e 1.474,51 U\$ ha⁻¹ em cana-planta, 1^a e 2^a socas, respectivamente. A cana-de-açúcar sob regime de sequeiro, em Rio Largo-AL, está exposta a médio risco climático e a ET_r , nos cultivos irrigados, diminui proporcionalmente com o nível de irrigação adotado. A quantidade de ATR por tonelada de cana varia com a lâmina de irrigação, mas o rendimento agroindustrial final por unidade de área cultivada é dependente da produtividade de colmos; no entanto, a lâmina econômica de irrigação no intervalo de 0 a 150% da ET_0 é diretamente proporcional ao aumento do preço do ATR.

Palavras-chave: gotejamento, evapotranspiração real, produtividade agroindustrial.

EVAPOTRANSPIRATION AND ECONOMIC ANALYSIS OF IRRIGATION IN SUGARCANE

ABSTRACT

The use of irrigation in sugarcane requires close attention because the farmer must use the amount of input that provides the maximum economic return. Therefore, to optimize the use of water in irrigation of sugarcane, this study aimed to analyze the levels of this resource that would provide economically viable yields along of the ratoons. The experiment was conducted at the Agrarian Science Center (CECA/UFAL) in Rio Largo, Alagoas, using the variety RB92579 drip irrigated with seven irrigation depths (levels 0, 25, 50, 75, 100, 125 and 150% of daily average reference evapotranspiration- ET_0 of dry season), in three cycles of production of sugarcane between January 2009 and February 2012. The crop evapotranspiration (ET_c) and the real evapotranspiration (ET_r) of sugarcane were estimated by the dual K_c methodology, which separates the effects of transpiration and direct evaporation of soil water. Was calculated the Satisfaction Index of Water Requirements (ISNA) to rainfed treatment and the relative evapotranspiration of crop (ER) for all treatments. The crop and agroindustrial yield was used for adjusting response curves to irrigation depths. The average ET_r in the maximum growth phase of the three cycles ranged from 1.73 to 5.04 mm day⁻¹ in the treatments with 0 and 150% of ET_0 , respectively. The irrigated sugarcane with maximum K_c of 1.5 (150% of ET_0) in the first, second and third cycles of cultivate produced an average of 48.0 t ha⁻¹ more than the sugarcane cultivated without irrigation. For an average value of 0.55 R\$ kg⁻¹ of commercially recoverable sucrose content (CRS), the depth of maximum economic efficiency was 666 (85% of ET_0), 290 (65% of ET_0) and 397 mm (70% of ET_0) with profit of 3,272.07; 2,456.90 and 1,474.51 US\$ ha⁻¹ in plant cane, 1st and 2nd ratoon, respectively. The sugarcane, in rainfed conditions in Rio Largo, Alagoas, is exposed to average climatic risk and the ET_r , in the irrigated crops, decreases proportionally with the level of irrigation adopted. The amount of CRS per ton of cane varies with irrigation depth, but the final agroindustrial yield per acreage unit is more dependent on stalk yield; however, the economic irrigation depth in the range 0 to 150% of ET_0 is directly proportional to the increase in the price of CRS.

Keywords: drip, real evapotranspiration, agroindustrial yield.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura agrícola produzida em diversas regiões climáticas do mundo e possui alto valor econômico devido à sua utilização na produção de açúcar, etanol e pelo uso de biomassa para a geração de energia elétrica. Sua produção agrícola mundial gira em torno de 1,5 bilhão de toneladas de colmos por ano. No Brasil, o maior produtor mundial, a atividade canavieira gera 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos que movimentam recursos da ordem de 51 bilhões de reais anuais, correspondente a 1,76% do PIB nacional ([Jornal Cana, 2010](#)). A área colhida de cana-de-açúcar é a terceira maior do Brasil sendo menor apenas que a área com soja e milho. A produção brasileira na safra 2013/14 foi estimada em 658,8 milhões de toneladas colhidas numa área de aproximadamente 8,8 milhões de hectares, com produtividade média de 74,7 t ha⁻¹. Esta produtividade foi 7,7% maior que a da safra 2012/13, que foi de 69,4 t ha⁻¹ ([Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB, 2014](#)).

O Estado de Alagoas é o maior produtor de cana-de-açúcar da região Nordeste e esta é a cultura agrícola de maior expressão socioeconômica, pois é responsável por aproximadamente 91,0 mil empregos diretos dos quais 77% são rurais e 23% são urbanos ([Sindicato do Açúcar e do Alcool do Estado de Alagoas-SINDAÇÚCAR-AL, 2011](#)). Esse Estado foi o sexto maior produtor brasileiro de cana na safra 2013/14, com produção estimada em 22,5 milhões de toneladas de colmos, produtividade de 53,8 t ha⁻¹ e área colhida de aproximadamente 417,5 mil hectares, apresentando produção superior à da safra 2012/13 em 4,6% ([CONAB, 2014](#)). Mesmo possuindo elevado nível tecnológico no setor sucroalcooleiro, Alagoas tem problemas que afetam a produção de cana-de-açúcar, destacando-se a distribuição irregular de chuvas durante o ano, visto que, ainda que a média pluviométrica anual seja de 1.800 mm, cerca de 70% das chuvas se concentram no período de abril a agosto enquanto 30% se distribuem de outubro a fevereiro; sendo assim, há grande probabilidade de ocorrer déficit hídrico em cultivos de sequeiro durante os meses de outubro a fevereiro ([Souza et al., 2004](#); [Carvalho et al., 2013a](#); [Carvalho et al., 2013b](#)).

A falta de uniformidade na distribuição pluvial no decorrer do ano resulta em menor armazenamento de água no solo durante o período seco, causando redução na evapotranspiração, no crescimento e na produtividade das culturas agrícolas ([Souza et al., 2004](#); [Silva et al., 2014](#)). Este efeito foi observado por [Abreu et al. \(2013\)](#), que estudaram o comportamento de diversas variedades de cana-de-açúcar cultivadas em regime de sequeiro durante três ciclos de produção nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas e concluíram que, no ciclo em que ocorreu maior déficit hídrico, a produtividade agrícola e a agroindustrial foram afetadas significativamente; desta forma, para que os rendimentos da agroindústria canavieira não sejam prejudicados, dependendo da quantidade e da uniformidade de distribuição da precipitação pluvial, é necessário o uso de irrigação ([Teodoro et al.,](#)

2009); porém, tendo em vista a grande demanda de água durante o ciclo de produção, precisa-se de sistemas de irrigação mais eficientes no uso da água, como o gotejamento, por exemplo (Parkes et al., 2010; Boas et al., 2011; Martins et al., 2011). Doorembos & Kassan (1994) descrevem que a demanda hídrica da cana-de-açúcar nos trópicos e subtropicais secos é de 1.500 a 2.500 mm e que os bons rendimentos agrícolas em áreas irrigadas devem estar acima de 100 Mg ha⁻¹.

Estudos recentes realizados no Brasil (Farias et al., 2008; Oliveira et al., 2009; Silva et al., 2014) demonstram que a resposta da cana-de-açúcar à irrigação é significativa e pode ser utilizada como fator decisivo na implementação de tecnologias nos canaviais; entretanto, devido às diferentes características do solo, clima e genótipos utilizados, é preciso que experimentos sejam conduzidos nos diversos ambientes de produção para que se quantifique o nível dessa resposta (Dalri & Cruz, 2008; Dalri et al., 2008; Carvalho et al., 2009). Por outro lado, como a irrigação é um dos fatores de maior influência na produtividade e no custo de produção da cana-de-açúcar (Teodoro et al., 2013), o uso desta técnica agrícola nos canaviais requer bastante atenção, haja vista o agricultor deve utilizar a quantidade do insumo (água) que proporcione o máximo retorno econômico (Fernandes, 2003).

A quantificação ideal do insumo é feita medindo-se a produtividade da cultura sob vários níveis do mesmo e o ajustando a uma curva de resposta através de funções de produção. Porém, as curvas de resposta podem diferir ao longo dos ciclos de produção, de vez que as produtividades das socarias tendem a serem menores devido à redução do vigor vegetativo, ataque de pragas e doenças que se intensificam com o envelhecimento das cepas das plantas, entre outros fatores; isto significa que a mesma lâmina aplicada em todos os ciclos de produção proporciona produtividades diferentes as quais nem sempre são economicamente viáveis. Assim, para otimizar o uso da água na irrigação da cana-de-açúcar, é conveniente analisar os níveis deste recurso que proporcionem produtividades economicamente viáveis ao longo das socarias.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O objetivo desta pesquisa é estimar a evapotranspiração real e a lâmina econômica de irrigação por gotejamento em diferentes ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, na região de Rio Largo, AL.

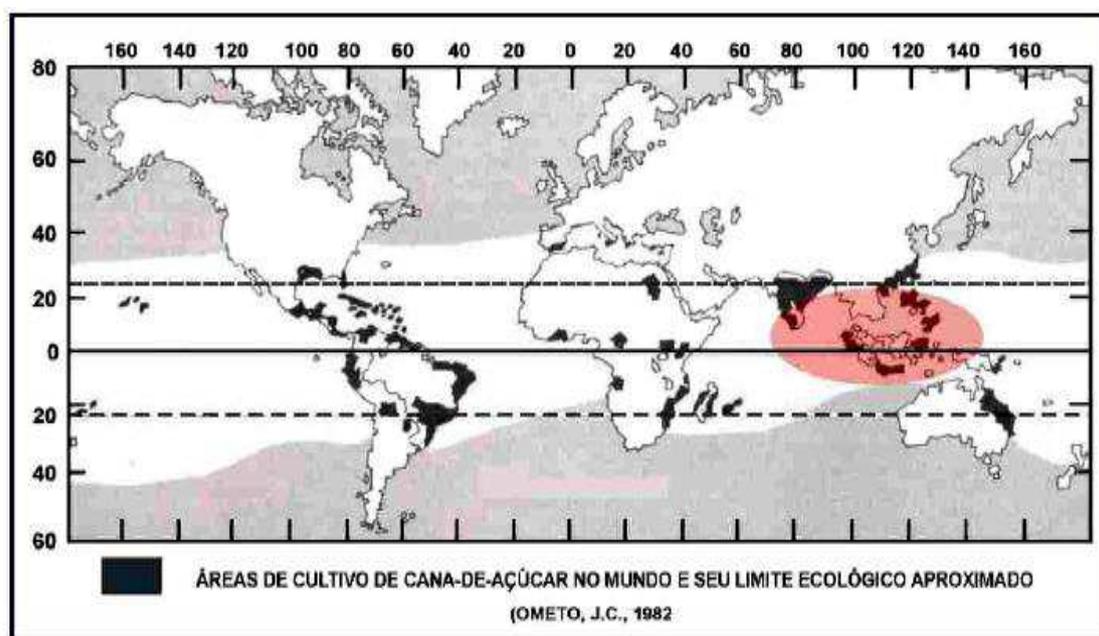
2.2. Específicos

- Estimar a evapotranspiração real da cultura em diferentes regimes hídricos, separando os efeitos de transpiração e evaporação;
- Calcular o balanço de água no solo para lâminas de irrigação;
- Determinar a lâmina de irrigação que proporciona a maior produtividade agroindustrial e a maior eficiência econômica;
- Calcular os índices de uso da água: Índice de Satisfação da Necessidade de Água (ISNA) e evapotranspiração relativa da cana-de-açúcar.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1.A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) tornou-se cultura mundialmente conhecida como uma das que possuem alto valor econômico sendo cultivada em diversos países situados entre os paralelos 35° N e 30° S (Figura 1), e em altitudes desde o nível do mar até 1.000 m (Ometo, 1982). Os variados fatores edafoclimáticos dos ambientes dessa grande faixa geográfica influenciam as fases de crescimento e produtividade dos canaviais. Portanto, torna-se necessário o conhecimento das fases de desenvolvimento da cultura para determinar técnicas agrícolas apropriadas para cada ambiente em que a cana-de-açúcar é cultivada. Essas técnicas são desenvolvidas a partir de estudos sobre o ciclo de produção, variáveis meteorológicas, consumo de água da planta, produtividade etc..



Fonte: Ometo (1982).

Figura 1. Faixa territorial de cultivo da cana-de-açúcar e região de origem destacado em vermelho.

As fases do ciclo fenológico em que a cultura sofre mudanças exteriores (morfologia), ou seja, como a planta se desenvolve ao longo de todo o seu ciclo de vida, são divididas em enraizamento e brotação, crescimento e perfilhamento, formação da sacarose, florescimento, frutificação, formação das sementes e maturação (Castro, 2000); no entanto, nos cultivos comerciais o ciclo de produção desta cultura permanece até a formação da sacarose, em que, logo após, a planta é induzida a um estágio considerado como maturação, devido ao alto teor de açúcar armazenado no colmo.

O ciclo de produção da cana-de-açúcar pode durar de 12 a 18 meses, sendo esta variação dependente da variedade e do ambiente de cultivo. As fases do ciclo de cultivo são divididas em quatro, conforme descrito na Figura 2: plantio, crescimento, maturação e corte.

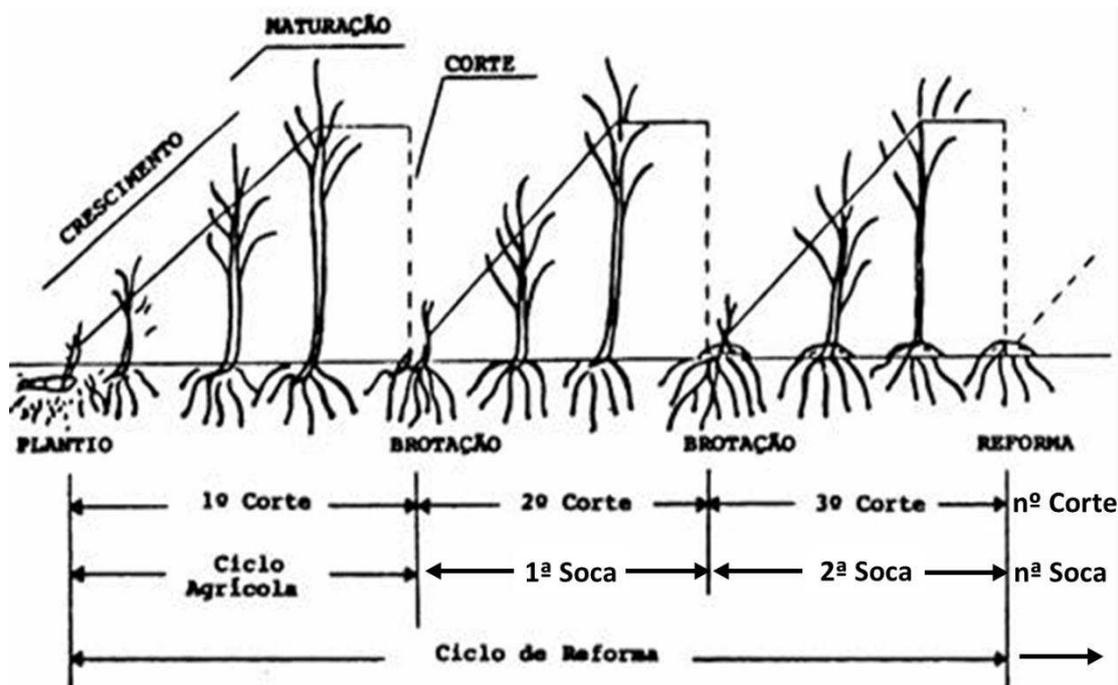


Figura 2. Fases do ciclo de produção da cana-de-açúcar.

O início do ciclo da cana-planta se dá quando há emergência do primeiro broto nas socarias (segundo ciclo de produção em diante), como a touceira já está formada, ocorre o surgimento de vários brotos concomitantemente na mesma touceira, além do que a brotação da soca ocorre pelo rizoma da cana que foi colhida; nesta fase inicial da cultura ocorrem a brotação, o enraizamento e a emergência dos brotos, entre 20 a 30 dias após o plantio (DAP). Como o broto depende das reservas presentes no tolete, a brotação depende muito da qualidade da muda, além do ambiente, época e manejo de plantio (Castro, 2000; Toppa et al., 2010). A velocidade com que emerge a brotação do tolete está à mercê da cultivar (emergência rápida ou lenta), do estado nutricional e umidade do tolete, umidade no solo e no ar, da temperatura (ótimas entre 34 e 37°C, limitantes abaixo de 21°C e acima de 44°C), e da aeração do solo (compactação e drenagem deficientes causam falta de oxigênio para a respiração dos tecidos e das raízes).

O início do perfilhamento ocorre em torno de 40 DAP (Toppa et al., 2010). Após a emergência do perfilho primário na superfície do solo e, simultaneamente ao seu crescimento, observa-se o desenvolvimento de novas raízes na base do colmo. Das gemas dos colmos primários se originam os colmos secundários e desses se desenvolvem os colmos terciários. À medida que esses colmos vão aparecendo, seu sistema radicular vai aumentando o sistema radicular da touceira. O número de perfilhos por unidade de área é uma variável importante, visto estar associado à

produtividade dos cultivos. Quando os perfilhos maiores chegam a 50 cm de altura do colarinho da folha +1, começa a concorrência por luz, água e nutrientes entre plantas. O número de perfilhos estabiliza e depois, com o crescimento dos colmos dominantes, há a eliminação dos mais fracos, doentes e malposicionados.

A fase de crescimento dos colmos é caracterizada pelo aumento da altura dos colmos sobreviventes da fase de perfilhamento. De 60 a 120 dias após o plantio (DAP), aproximadamente 100% do sistema radicular se concentram nos primeiros 30 cm de solo e as raízes do tolete já não existem. Quando a planta atinge o perfilhamento máximo e a competição entre eles se intensifica, os mais desenvolvidos continuam crescendo em altura e espessura. Sem a utilização da energia química produzida na fotossíntese para emitir perfilhos, começa o acúmulo de sacarose nos entrenós basais dos colmos mais velhos. Nesta fase, as folhas mais velhas secam e há, então, um crescimento intenso do sistema radicular; esta fase se inicia no auge do perfilhamento e vai até o início do acúmulo intenso de sacarose (maturação).

Influenciada por baixa temperatura ou baixa umidade, a maturação aumenta e o crescimento vegetativo é desfavorecido, em que os colmos são considerados industrializáveis; dependendo da variedade, região e época de plantio, a fase de maturação pode iniciar-se de 8 a 20 meses após o plantio.

O ciclo de produção da cana soca pode ser menor que o da cana-planta devido às características fisiológicas do tolete, à influência das condições ambientais e prática de manejo, o que resulta em menor ou maior produtividade de colmos. Além disto, os constituintes mais importantes do colmo, como sacarose e fibra, são afetados ao longo das socarias. Como esses componentes são os de maior interesse econômico, quando a cultura chega ao 6º ou até ao 8º ciclo, dependendo do manejo, é necessário fazer a renovação do canavial. Alguns produtores chegam a renovar canaviais com até 10 anos; porém, isto varia com a nutrição da planta, sistema de irrigação, sistema de colheita (manual ou mecanizado) etc..

Ao se determinar a duração das fases do ciclo de produção da cana-de-açúcar, deve-se estar atento à profundidade da raiz, pois esta influencia diretamente o cálculo do balanço de água no solo, o qual requer a profundidade em que está situado o sistema radicular efetivo da cultura; portanto, é necessário determinar a que profundidade está a raiz em cada fase do ciclo; no entanto, em situação de déficit de água na profundidade determinada, algumas variedades podem absorver água através de raízes mais profundas para realizar seu metabolismo e efetuar a transpiração.

O sistema radicular da cana-de-açúcar é do tipo fasciculado e bem desenvolvido, sendo que seu desempenho varia com a textura do solo e condições hídricas. As primeiras raízes em cana-planta são chamadas raízes de fixação e são formadas a partir dos primórdios radiculares do tolete plantado. Durante os primeiros 30 dias a cana utiliza as reservas nutricionais contidas no tolete, mas

grande parte de sua sobrevivência se dá pela absorção de água e sais minerais pelas raízes de fixação; em seguida, ocorre o surgimento das raízes dos perfilhos e as raízes originárias do tolete praticamente não mais existem. Entre 90 e 120 dias o sistema radicular se encontra nos primeiros 30 cm de solo. Como cada perfilho possui sistema radicular próprio, na medida em que cresce o número de perfilhos o sistema radicular da touceira aumenta explorando o solo até um ponto de estabilização quando, a partir daí, ocorrem renovações das raízes velhas (Buso et al., 2010).

As raízes mais ramificadas e absorventes são chamadas superficiais ou fibrosas e se concentram nos primeiros 30 a 40 cm do solo. As raízes de fixação conseguem atingir maiores profundidades ultrapassando facilmente 50 cm em que, além da função de fixação da touceira no solo, podem também absorver água e nutrientes com menor eficiência que as superficiais. As raízes que atingem profundidades maiores que 5 m são denominadas raízes cordão; porém, o desenvolvimento dessas raízes só é possível quando não há impedimentos químicos ou físicos, como em argissolos e latossolos amarelos dos tabuleiros costeiros da região litorânea do Nordeste os quais apresentam horizontes ou camadas endurecidas e fortemente adensadas (horizonte BA e parte do Bt ou do Bw), quando secos, designadas como fragipãs e duripãs (Moreau et al., 2006).

A cana-de-açúcar emite, quando irrigada por gotejamento, raízes absorventes e de fixação na profundidade média de até 40 cm, pois a água e os nutrientes se concentram nessa profundidade, o que pode danificar a colheita mecanizada; desta forma, deve-se utilizar no cálculo do balanço de água no solo para cana irrigada por gotejo, menores profundidades, desde que sejam medidas ou descritas em literaturas da mesma região.

3.2. Relação água-solo-planta-atmosfera

A água é essencial para que ocorra a síntese de sacarose nas folhas e para que esta seja translocada para o colmo, além de melhorar a qualidade do caldo na extração. Quando ocorre déficit hídrico a fotossíntese continua, mas em taxa reduzida; assim, a planta começa a produzir menos açúcar e o que já foi produzido é armazenado nos colmos devido à sua pequena utilidade fisiológica; ou seja, o aumento da sacarose não se torna mais tão importante em virtude da sua dificuldade de extração e em razão da sua menor tonelagem, em função das restrições de crescimento.

Quando o armazenamento de água no solo chega a zero, a cultura se encontra com as folhas totalmente em estado de murcha temporária e a transpiração ocorre à taxa insignificante, em que a água transpirada é proveniente da reserva na planta mas nunca da água de constituição dos tecidos. Tosello et al. (1966) admitiram que se deve irrigar quando 70% da água do solo forem consumidos ($p=0,7$). Barbosa et al. (2014) relatam que quando o nível de água disponível no solo se esgota as

plantas buscam mecanismos mais eficazes de resistência à seca como, por exemplo: evitar a perda excessiva de água para a atmosfera, exploração mais eficaz da água disponível no solo, tanto para prevenir o estresse hídrico quanto para resisti-lo.

O estudo da relação água-solo-planta-atmosfera é dividido em dois processos separados (Allen et al., 1998). Um é a água perdida da superfície do solo por evaporação e o outro se refere à água perdida pela cultura através de transpiração, em que a combinação dos dois é chamada de evapotranspiração da cultura (ET_c). Alguns autores definem a quantidade de água perdida por evapotranspiração como exigência de água da cultura devido à equivalência de ambas. Embora a ET_c seja semelhante à exigência de água da cultura, esta última se refere à quantidade de água que precisa ser fornecida, enquanto que a evapotranspiração da cultura se refere à quantidade de água que está sendo perdida para a atmosfera. Quando o solo se encontra com sua capacidade total de água disponível (CAD), a ET_c tende a atingir seu máximo; entretanto, devido a condições não ótimas como a presença de pragas e doenças, salinidade de solo, baixa fertilidade do solo, escassez de água ou saturação, a ET_c se torna diferente da máxima e assim é chamada de evapotranspiração real (ET_r) (Allen et al., 1998).

A necessidade de água para se ter bons índices de crescimento, desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar oscila com a variedade e principalmente com a precipitação pluviométrica da região, em que se pode precisar ou não de irrigação. Doorenbos & Kassan (1979) descrevem que a necessidade hídrica da cana-de-açúcar nos trópicos e sub-trópicos secos é de 1.500 a 2.500 mm de chuva ou lâminas de irrigação por ciclo para atingir a produção potencial dependendo do tempo de cultivo que varia de 12 a 18 meses e da região climática estudada; contudo, a cana-de-açúcar é mais exigente em água no período que vai de 120 a 240 dias após o plantio (DAP), quando a evapotranspiração é máxima (Keating et al., 1999).

Para se calcular o volume de água necessário precisa-se estar atento às condições hídricas do solo e ao consumo de água pela planta. Para tal, o cálculo da ET_c e do armazenamento de água no solo em função dos elementos climáticos é simples e prático (Lyra et al., 2007a). Entretanto, a escolha do método da estimativa do coeficiente da cultura (K_c) é que determina o nível de precisão do cálculo da ET_c . Para escalas de tempo que variam de uma semana a intervalos maiores, recomenda-se o método de K_c único; porém, para estudos mais precisos o método de K_c duplo é recomendado (Allen et al., 1998).

3.3. Índice de satisfação das necessidades de água e evapotranspiração relativa

O Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) foi desenvolvido, originalmente, pela Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) a fim de avaliar o rendimento das

culturas com limitações hídricas durante o período de crescimento (Doorenbos & Pruitt, 1977). Este índice representa a relação entre a quantidade de água que a planta consumiu durante o ciclo ou em determinado período e a que seria necessário para atingir sua produtividade ao máximo. É definido como a relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima (E_{Tr}/E_{Tc}), e seu valor varia entre 0 a 1; ou seja, quanto mais próximo de 1 maior a quantidade de água armazenada no solo. A classificação quanto ao grau de risco climático obtido ao longo dos períodos de simulações é estabelecida em três classes de ISNA: (i) $ISNA \geq 0,65$ - a cultura da cana-de-açúcar de sequeiro está exposta a um baixo risco climático, (ii) $0,55 \leq ISNA < 0,65$ - a cana-de-açúcar de sequeiro está exposta a médio risco climático e (iii) $ISNA < 0,55$ - a cultura da cana-de-açúcar de sequeiro está exposta a um alto risco climático (Silva et al., 2013).

Ao contrário do ISNA, a evapotranspiração relativa (ER) pode ser aplicada aos cultivos irrigados quantificando-se a redução da evapotranspiração real da cultura através do mesmo procedimento de cálculo. Em áreas irrigadas um valor aceitável de ER está acima de 0,75 (Roerink et al., 1997).

3.4. Irrigação no cultivo da cana-de-açúcar

A irrigação na agricultura é uma técnica que deve ser utilizada não só para suprir a deficiência hídrica no período seco, mas também dar condições para que o material genético expresse, em campo, todo o seu potencial de produção. Contudo, a água é um recurso que nos últimos anos está sendo alvo de muitas discussões quanto ao seu uso e disponibilidade. Assim, para se utilizá-la com economia, os projetos de irrigação precisam ser melhor manejados para aumentar a eficiência no uso da água. Os sistemas de irrigação localizada, além de serem os mais eficientes no uso da água, apresentam as vantagens de melhor distribuição de adubos via irrigação, baixo consumo de energia e manutenção da umidade do solo sempre próximo à capacidade de campo (Parkes et al., 2010; Boas et al., 2011; Martins et al., 2011).

Existem vários tipos de irrigação, os quais são diferenciados pela quantidade de água utilizada, pelo sistema de irrigação utilizado e pela fase do ciclo de produção da cultura em que se trabalha. Os tipos de irrigação mais comuns no cultivo da cana-de-açúcar são: irrigação de salvação, irrigação complementar e irrigação plena. Na irrigação de salvação são aplicadas lâminas de 40 a 60 mm durante o ciclo, aplicadas via aspersão de alta pressão; a irrigação complementar é caracterizada por ser uma complementação hídrica superior à salvação com lâminas entre 180 e 300 mm, parceladas em três ou cinco vezes através de carretéis irrigadores, pivôs circulares e laterais móveis (lineares); a irrigação plena supre toda a demanda hídrica da cultura, na qual são aplicados, em Alagoas, de 300 a 800 mm durante o ciclo; este último tipo é utilizado com o objetivo de

otimizar a produtividade e a economia de água em que, ultimamente, o gotejamento vem sendo aperfeiçoado.

3.5. Produtividade agrícola e agroindustrial

A produtividade agrícola da cana-de-açúcar é medida em toneladas de colmos por hectare (TCH), em que se avalia a biomassa dos colmos produzidos durante o cultivo; porém, esta produtividade depende da variedade e do sistema de cultivo utilizado. De acordo com [Doorenbos & Kassan \(1979\)](#), os bons rendimentos agrícolas em áreas irrigadas devem estar acima de 100 t ha⁻¹.

[Teodoro et al. \(2009\)](#), observaram, em um experimento de sequeiro com variedades de cana-de-açúcar na região de Rio Largo-AL, que a cultivar RB92579 foi a que mais produziu, atingindo pouco mais de 100 t ha⁻¹. [Almeida et al. \(2008\)](#), no entanto, constataram que a variedade RB92579, cultivada na região de Rio Largo-AL e irrigada apenas na fase de estabelecimento, produziu 167,8 t ha⁻¹ e 136,2 t ha⁻¹ no primeiro e segundo ciclos de produção, respectivamente. [Rodrigues et al. \(2012\)](#) mediram, ao estudar a RB92579 irrigada no primeiro ciclo e em sequeiro no segundo ciclo de produção, rendimento agrícola de 192 e 111 t ha⁻¹, respectivamente, na região de Conceição da Barra-ES.

[Vieira et al. \(2012\)](#) encontraram, ao trabalhar com a variedade RB867515 irrigada por pivô central, produtividade máxima de 125,9 t ha⁻¹ com lâmina total (chuva + irrigação) de 1.854,4 mm; a lâmina de maior eficiência econômica (chuva mais irrigação) foi de 1.726,2 mm para uma produtividade de 123,9 t ha⁻¹.

Quando o objetivo é quantificar a produtividade da cultura em função de vários níveis de um insumo, utiliza-se uma curva de produtividade, a qual é determinada por uma função de resposta, mas as curvas de resposta podem diferir ao longo dos ciclos de produção, pois as produtividades das socarias tendem a ser menores devido à redução do vigor vegetativo, significando que a mesma lâmina aplicada em todos os ciclos de produção proporciona produtividades diferentes, embora nem sempre sejam economicamente viáveis.

3.6. Função de produção

A escolha e/ou tomada de decisão com relação ao uso de recursos na agricultura se baseia no princípio de que cultivos respondem aos insumos utilizados de forma diferenciada. Essas respostas podem ser explicadas através de equações matemáticas em que se emprega a relação fator-produto, ou seja, a quantidade produzida em função dos insumos empregados, quando um depende ou é uma função do outro. De acordo com [Frizzone \(1998\)](#), o nível de produto é função do nível de cada um

dos insumos usados bem como qualquer interação que possa ocorrer entre eles. Além disso, para se derivar uma fórmula matemática que descreva a relação exata entre a variável produto (Y) e a variável insumo (X), precisa-se manter experimentalmente constante todas as outras variáveis consideradas de menor importância para o trabalho, como na Equação 1; no entanto, deve-se ter a compreensão sólida das características biológicas da cultura frente ao fator estudado e da natureza do problema da produção antes da escolha do modelo matemático, o que se deve ao tipo de retorno da cultura, o qual pode ser constante, crescente ou decrescente. Desta forma, quando a cultura apresenta sua máxima taxa de retorno, tem-se a máxima eficiência do uso do insumo ou recurso variável.

$$Y = f(X_1 | X_2, X_3, X_4, X_5, \dots, X_n) \quad (1)$$

A maximização e a minimização de funções aplicadas em economia podem ser resolvidas por intermédio do cálculo diferencial ou uso de derivação. Como a derivada da função de uma variável é também uma função da mesma variável, é possível continuar o processo de derivação e se obter o que se chama de derivada segunda, terceira etc.; porém, em certo momento as derivadas que ultrapassam certo estágio se tornam iguais a zero; assim, a grandeza numérica da primeira derivada pode ser utilizada para medir o ritmo de crescimento ou de diminuição e a inclinação ascendente ou descendente da curva de produtividade da cultura em determinado ponto.

A técnica de derivação pode ser utilizada para o cálculo da produtividade máxima física e econômica, desde que se continue o processo de derivação da função de produção encontrada. Se $f''(a)$ é positiva, isso explica que $f(x)$ varia a taxa crescente quando X passa por a ; da mesma forma, quando $f''(a) < 0$, a função $f(x)$ varia a uma taxa decrescente quando X aumenta e passa pelo ponto a . Quando $f''(x) = 0$, este será o ponto de inflexão da função $f(x)$ e pode ser observado pela mudança de sinal de $f''(x)$ quando se aumenta X ; assim, para saber se este é o ponto de máximo ou mínimo da função precisa-se continuar o processo de derivação até ocorrer a mudança de sinal; esta técnica é bastante aplicada à função quadrática ($Y = a + bX + cX^2$); no entanto, esta se torna uma função de produção quando $b > 0$ e $c < 0$, para que haja um limite na aplicação do insumo; assim, para maximizar ou minimizar uma função calcula-se sua primeira derivada, que é então igualada a zero e se encontra o valor de X que maximiza o valor de Y . Se a derivada segunda é negativa, existe um ponto de máximo e, se é positiva, há um mínimo.

3.7. Rendimento ótimo econômico de culturas agrícolas

A economia de produção agrícola faz uso da matemática, pois esta fornece uma lógica ideal de princípios de maximização e minimização de insumos; entretanto, esta utilização de modelos matemáticos para maximizar a produção depende do uso de capital, mão-de-obra, terra e recursos de administração (Frizzone, 1998). Assim, observando esses parâmetros, torna-se possível a maximização de lucros com a minimização de custos.

A condição necessária para maior eficiência econômica só pode ser definida quando forem usadas as relações de preço, pois os preços são indicadores de escolha para uma situação ótima. Um indicador de escolha define a condição de um máximo e é sempre expresso como uma relação ou proporção. Conforme Fernandes (2003), o cálculo é bastante simples e fácil, podendo ser realizado através do parâmetro margem de contribuição agrícola (MCA), que representa a diferença entre a receita bruta obtida com os produtos e os custos fixos e variáveis do sistema de produção.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e condução do experimento

O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (09°28 02''S; 35°49 43''W; 127m) em Rio Largo, AL (Figura 3), no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2012, numa área de 0,5 ha, em três ciclos de produção da cultura da cana-de-açúcar.



Figura 3. Mapa da área canavieira de Alagoas e imagem obtida no Google Maps do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, localizado no município de Rio Largo, destacando a estação meteorológica (quadro com borda amarela) e a área destinada ao experimento (quadro com borda vermelha tracejada).

O delineamento estatístico utilizado foi blocos casualizados com sete tratamentos e quatro repetições (Figura 4). As parcelas foram constituídas de 10 linhas com 12 m de comprimento e os tratamentos foram 7 lâminas de irrigação nos níveis de 0 (L0), 25 (L1), 50 (L2), 75 (L3), 100 (L4), 125 (L5) e 150% (L6) da média diária ($4,5 \text{ mm dia}^{-1}$) da evapotranspiração de referência (ET_0) normal climática do período de baixa precipitação pluviométrica; enfim, o manejo e o controle das lâminas de irrigação foram realizados por um sistema automatizado e aferido por hidrômetros.

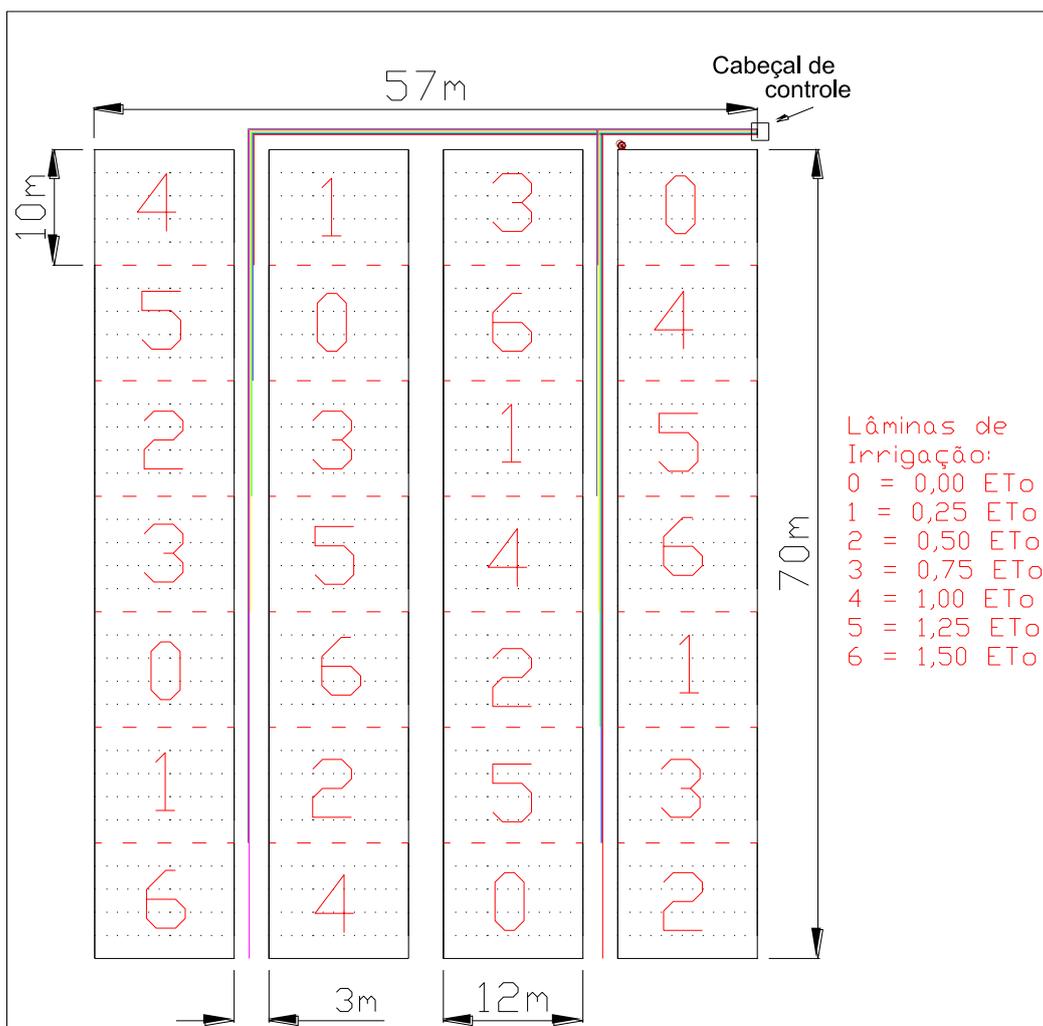


Figura 4. Croqui do experimento.

A classificação do solo foi realizada por [Carvalho \(2003\)](#) e as características físicas estão descritas na Tabela 1. O clima é caracterizado, pela classificação de Thornthwaite e Mather, como quente e úmido (B_1), megatérmico (A'), com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w_2). A precipitação pluvial média da região é de 1.800 mm ([Souza et al., 2004](#)).

Tabela 1. Características físicas do solo e classificação realizada por [Carvalho \(2003\)](#).

Características Físicas	Resultados
tipo de solo	Latossolo Amarelo coeso argissólico
textura	média/argilosa
VIB (mm h^{-1})	52
densidade volumétrica (Mg m^{-3})	1,5
porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,423
θ_{CC} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,2445
θ_{PMP} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,1475
declividade média (%)	< 2

O sistema de irrigação utilizado foi gotejamento superficial com fitas gotejadoras de 22 mm de diâmetro, gotejadores a cada 0,5 m e 2,0 m entre linhas, pressão de serviço de 14 mca e vazão nominal de 1,0 L h⁻¹ (Figura 5). A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB92579, plantada em fileiras duplas no espaçamento de 1,4 m x 0,6 m. Esta variedade foi escolhida por ser a mais utilizada comercialmente no Estado de Alagoas. O plantio foi realizado no período de 12 a 21 de janeiro de 2009. A calagem e a adubação com NPK foram realizadas manualmente, conforme os resultados da análise química do solo. A cana-planta foi adubada no fundo do sulco com 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 200 kg ha⁻¹ de K₂O. Aos 66 dias após o plantio aplicou-se, em cobertura, uma média de 100 kg ha⁻¹ de nitrogênio. A cana-soca foi adubada aos trinta dias após o corte com 120 kg de P₂O₅, 160 kg de K₂O e 100 kg ha⁻¹ de nitrogênio. A fonte de nitrogênio utilizada nos três ciclos de produção foi ureia, a qual foi incorporada ao solo para evitar volatilização. A primeira colheita foi realizada em 22 de fevereiro de 2010, a segunda em 28 de fevereiro de 2011 e a terceira em 20 de fevereiro de 2012.

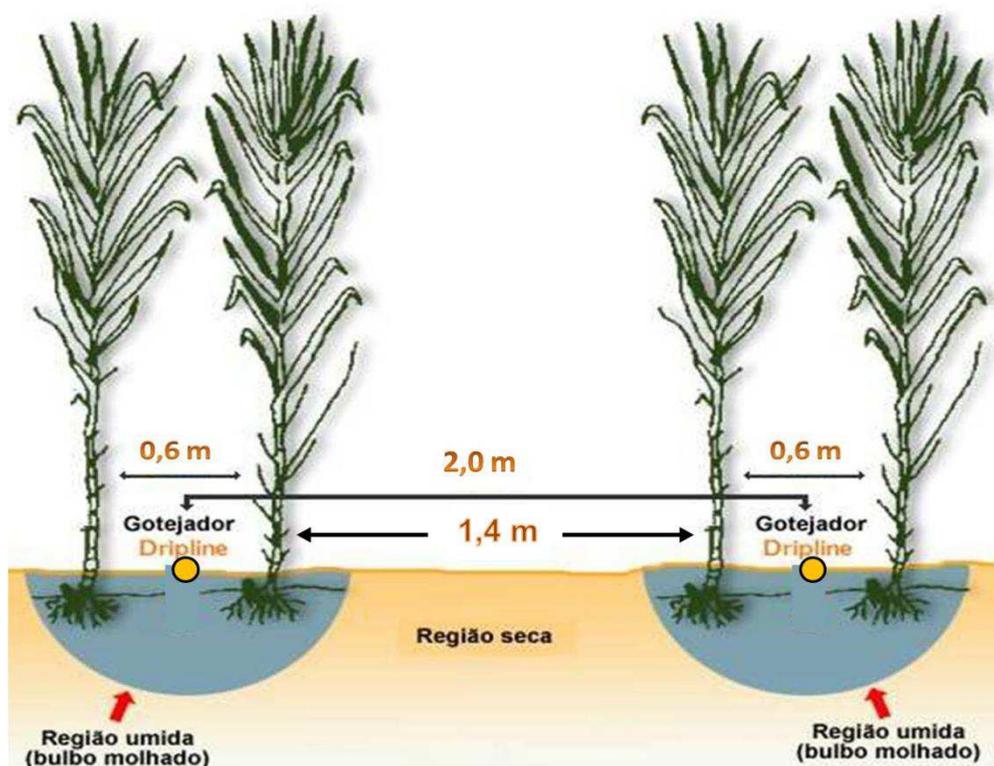


Figura 5. Detalhes do espaçamento entre linhas da cultura da cana-de-açúcar e da fita gotejadora.

4.2. Variáveis agrometeorológicas

As variáveis agrometeorológicas foram cedidas pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS), o qual mantém uma estação automática de aquisição de dados Micrologger CR10X (Campbell Scientific, Logan, Utah) instalada a cerca de 400 m do experimento.

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pelo método de Penman-Monteith, FAO-56 (Allen et al., 1998):

$$ET_0 \text{ (mm dia}^{-1}\text{)} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T+273}\right) U_2 (e_s - e)}{\Delta + [\gamma (1+0,34 U_2)]} \quad (2)$$

em que Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor d'água saturado versus temperatura do ar (kPa °C⁻¹); R_n é o Saldo de radiação medido (MJ m⁻² dia⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ é o Coeficiente psicrométrico; T é a temperatura média do ar; U_2 é a velocidade média do vento a 2m de altura (m s⁻¹); e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa) e e é a pressão do vapor d'água do ar (kPa).

A evapotranspiração real da cultura (ET_r) foi calculada pelo método “dual” (Allen et al., 2005), em que o K_c foi dividido em dois coeficientes separados, um para transpiração da cultura (K_{cb}) e outro para evaporação do solo (K_e), conforme a dedução na Equação 3. O coeficiente K_s representa os efeitos do déficit de água no solo na zona radicular sobre ET_r . A evapotranspiração máxima da cultura [$ET_c = (K_{cb} + K_e) \times ET_0$] foi estimada através de simulação em que o solo esteve na capacidade de campo durante todo o ciclo de cultivo, com área de solo para evaporação da água em condições normais, ou seja, sem ser reduzida, igual a 100% menos o sombreamento como no caso de cana irrigada por aspersão.

$$ET_r = K_s ET_c = K_s K_c ET_0 = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (3)$$

Foram utilizados os valores de K_{cb} da Tabela 2 que são os recomendados pela *Food Agriculture Organization* (FAO), em que os valores para K_{cb} na fase de crescimento e entre a fase intermediária até o valor final foram estimados pela Equação 4. K_{cb_meio} e K_{cb_final} foram ajustados pela Equação 5 (Allen et al., 1998). Os valores para $K_{cb_inicial}$ não precisaram ser ajustados, pois o efeito da transpiração é insignificante comparado ao efeito da evaporação. Os valores de K_{cb} tabelados no boletim FAO-56, foram determinados para condições de clima subúmido com umidade relativa mínima média diária (UR_{min}) cerca de 45% e com velocidade do vento moderada em torno de 2 m s⁻¹. Para condições mais áridas ou úmidas, como é o caso da região de Rio Largo, AL, ou para condições de vento mais acentuado, os valores de K_{cb} para os estádios intermediário e final precisam ser modificados. Assim, os valores de K_{cb} corrigidos neste trabalho foram menores que os tabelados, pois o clima é menos seco, as temperaturas são menores e a umidade relativa do ar é maior, fazendo diminuir a demanda atmosférica e a perda de água da planta através da transpiração.

Tabela 2. Valores do K_{cb} da cana-de-açúcar tabelados por Allen et al. (1998).

Fases	Duração	DAP	$K_{cb_tabelado}$
Inicial	50	0 - 50	0,15
Crescimento	190	51 - 240	
Intermediária	80	241 - 320	1,2
Final	51	321 - 371	0,7

$$K_{cbi} = K_{cb_anterior} + \left[\frac{i - \Sigma(L_{anterior})}{L_{atual}} \right] (K_{cb_seguinte} - K_{cb_anterior}) \quad (4)$$

em que K_{cbi} é o coeficiente basal da cultura no dia i ; i é o número de dias dentro do estágio de crescimento; $\Sigma(L_{anterior})$ é o somatório das durações de todos os estádios anteriores (dias); L_{atual} é a duração do estágio atual (dias).

$$K_{cb} = K_{cb_tabelado} + [0,04(U_2 - 2) - 0,004(UR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (5)$$

em que K_{cb} é o coeficiente basal da cultura; $K_{cb_tabelado}$ é o valor tabelado para a cana-de-açúcar; U_2 ($m\ s^{-1}$) é a velocidade média do vento a 2,0 m de altura sobre a grama durante o estágio intermediário ou final; UR_{min} (%) é o valor médio da umidade relativa do ar diária mínima durante o estágio intermediário ou final e h (m) é a altura média do dossel vegetativo da cultura.

Os valores para K_e foram calculados pela Equação 6. Quando o solo é molhado, a evaporação do solo ocorre em taxa máxima; porém, o coeficiente de cultura ($K_c = K_{cb} + K_e$) nunca pode exceder um valor máximo, K_{c_max} . Este valor é determinado pela energia disponível para evapotranspiração à superfície de solo ($K_{cb} + K_e \leq K_{c_max}$) ou $K_e \leq (K_{c_max} - K_{cb})$. K_e é regulado por K_r , que é o coeficiente de redução da evaporação e depende da umidade do solo. Após uma chuva ou irrigação K_r é 1, quando a superfície do solo está seca K_r se torna menor que um e a evaporação é reduzida. K_r é igual a zero quando não há água para evaporação na camada de solo superior.

$$K_e = \min(K_r(K_{c_max} - K_{cb}), few\ K_{c_max}) \quad (6)$$

em que few é a fração do solo exposto e umedecido, ou seja, a fração da superfície do solo na qual ocorre a maior parte da evaporação.

O K_{c_max} foi estimado pela Equação 7 e representa um limite superior na evaporação e transpiração de qualquer superfície cultivada e é imposto para refletir os obstáculos naturais colocados na energia disponível.

$$K_{c_max} = \max \left(\left(1,2 + (0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)) \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right), (K_{cb} + 0,05) \right) \quad (7)$$

em que: $\max ()$ é o valor máximo entre as expressões separadas pela vírgula; h é a altura máxima da planta no estádio considerado, em m.

O coeficiente K_r foi calculado através da Equação 8:

$$K_r = \frac{CTE - D_{e,i-1}}{CTE - CRE} \quad (8)$$

em que: K_r é o coeficiente de redução da evaporação dependente da depleção da água (lâmina cumulativa de evaporação) da camada da superfície do solo ($K_r = 1$ quando $D_{e,i} \leq CRE$ e no início da simulação); CTE é a lâmina máxima cumulativa de evaporação (depleção) da camada da superfície do solo quando $K_r = 0$ (mm); $D_{e,i-1}$ é a lâmina cumulativa de evaporação (depleção) da camada da superfície do solo ao término do dia anterior (mm); CRE é a água prontamente evaporada ou lâmina cumulativa de evaporação (depleção) ao término da fase 1 (mm), em que foi utilizado o valor ($8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) obtido de [Lyra et al. \(2007b\)](#).

A quantidade de água que pode ser evaporada durante um ciclo completo de secamento foi calculada como:

$$CTE = 1000(\theta_{CC} - 0,50_{PM})z_e \quad (9)$$

em que: CTE é a água evaporada total ou a lâmina máxima de água que pode ser evaporada do solo quando sua superfície, no início, foi completamente umedecida (mm); θ_{CC} é o conteúdo de água do solo na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_{PM} é o conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); z_e é a profundidade da camada superficial do solo, isto é, a que está sujeita ao secamento pela evaporação (0,15 m).

A fração da superfície do solo na qual a maioria da evaporação ocorre (f_{ew}) foi definida essencialmente conforme a Equação 10, em que f_c é a fração média da superfície do solo coberta por vegetação (0 – 0,99). Daí, $1 - f_c$ é a fração aproximada da superfície do solo que está exposta (FAO 56).

$$f_{ew} = 1 - f_c \quad (10)$$

em que: $1 - f_c$ é a média da fração do solo exposto, ou seja, não é coberta ou sombreada pela vegetação ($0,01 - 1$).

Para se obter os valores de f_c foi utilizada uma modificação dos valores recomendados por [Allen et al. \(1998\)](#), visto que os mesmos subestimam o fechamento do dossel da cultura na fase de crescimento máximo e na fase de maturação, na qual a cultura parece estar quase totalmente senescida, o que não ocorre no ciclo de produção comercial da cultura. Admitiu-se, portanto, os valores apresentados na Tabela 3 ([Silva et al., 2012a](#)).

Tabela 3. Valores de f_c adaptados por [Silva et al. \(2012a\)](#) para serem utilizados no ciclo de produção da cana-de-açúcar.

Fases	f_c	$1-f_c$
Inicial	0 - 0,7	1 - 0,3
Cresc.	0,7 - 0,99	0,3 - 0,01
Intermed.	0,99	0,01
Final	0,99 - 0,9	0,01 - 0,1

A Equação 10 assume que a fração do solo umedecido através da irrigação acontece dentro da fração do solo exposta a luz solar e ventilação. No caso de irrigação por gotejamento em que a maioria do solo umedecido através da irrigação pode estar embaixo do dossel e pode ser, então, sombreada, será necessário o ajuste da fração da superfície do solo umedecida através de irrigação (f_w : $0,01 - 1$). De acordo com a equação 11, o percentual de área molhada pelo gotejamento é de 30%, mas apenas parte desta área realmente fica exposta para ocorrer evaporação quando o dossel vegetativo ainda não está totalmente fechado (início do ciclo), chegando a ser sombreada na fase de crescimento máximo da cultura.

$$f_w = 0,3[1 - (2/3)f_c] \quad (11)$$

A equação usada para o balanço diário da água para a fração do solo exposto e umedecido (f_{ew}) foi a Equação 12, em que os limites impostos em $D_{e,i}$ são: $0 \leq D_{e,i} \leq CTE$.

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - P_i - I_i f_w + \frac{E_i}{f_{ew}} + DP_{e,i} \quad (12)$$

em que: $D_{e,i}$ é a lâmina cumulativa de evaporação (depleção) após um molhamento completo da superfície do solo ao término do dia i (mm); $D_{e,i-1}$ é a lâmina cumulativa de evaporação da fração da superfície do solo exposto e umedecido após seu molhamento completo ao término do dia i (mm); P_{i-1} é a precipitação ao término do dia i (mm); E_{i-1} é a evaporação ao término do dia i ($E_i = K_e ET_0$)

(mm); $DP_{e,i-1}$ é a perda por percolação profunda da camada de superfície do solo ao término do dia i se o conteúdo de água do solo exceder a capacidade de campo (mm); f_w é a fração da superfície do solo umedecido por irrigação (0,01 – 1); f_{ew} é a fração do solo exposto e umedecido (0,01 – 1).

Após uma chuva pesada ou irrigação, a drenagem (infiltração) da água da camada da superfície do solo foi estimada pela Equação 13; enquanto o conteúdo de água na camada superficial do solo está abaixo da CTE, o solo não drena e $DP_{e,i} = 0$.

$$DP_{e,i} = P_i + I_i f_w - D_{e,i-1} \quad (13)$$

K_s foi calculado pela expressão:

$$K_s = \frac{CAD - D_{r-1}}{CAD - AFD} = \frac{CAD - D_{r-1}}{(1-p)CAD} \quad (14)$$

em que: K_s é o fator de redução da transpiração dependente da água disponível do solo (0 – 1); D_{r-1} é a depleção na zona radicular do dia anterior (mm); CAD é a capacidade de água disponível total na zona radicular (mm); p é a fração da CAD que a cultura pode extrair da zona radicular sem sofrer estresse de água.

A capacidade de água disponível no solo foi estimada pela seguinte equação:

$$CAD = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PM})z_r \quad (15)$$

em que: CAD é a água disponível total na zona radicular (mm); θ_{cc} é o conteúdo de água na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$); θ_{PM} é o conteúdo de água no ponto de murchamento ($m^3 m^{-3}$); z_r é a profundidade efetiva do sistema radicular (m).

A profundidade do sistema radicular no dia i , durante a fase de crescimento, foi interpolada em função da variação entre as profundidades máxima e mínima, pela relação:

$$z_{r,i} = z_{r,i-1} + [(z_{r,x} - z_{r,n})/L_{cresc}] \quad (16)$$

em que: $z_{r,i-1}$ é a profundidade da raiz no dia anterior (m); $z_{r,n}$ e $z_{r,x}$ são, respectivamente, as profundidades mínima para cana-soca (0,3 m) e máxima (0,6 m) do sistema radicular; L_{cresc} é a duração da fase de crescimento (dias). Nas fases intermediária e final a profundidade da zona radicular foi considerada constante e igual a $z_{r,x}$.

A fração da CAD que a cultura pode extrair da zona radicular sem sofrer estresse de água foi calculada como:

$$AFD = p \text{ CAD} \quad (17)$$

em que: AFD é a água do solo facilmente disponível na zona radicular (mm); p é a fração média da Água do Solo Disponível Total (CAD), a qual pode ser esvaziada da zona radicular antes de ocorrer o estresse de umidade (K_s – redução na ET_c que varia de 0 a 1). Neste trabalho foi utilizado o valor de p de 0,60, ou seja, a cultura só gastou energia para absorver água quando apenas 40% da água retida no solo estiveram disponíveis.

O balanço de água diário, expresso em termos de depleção ao término do dia foi calculado pela Equação 18, em que os limites impostos em $D_{r,i}$ são: $0 \leq D_{r,i} \leq CAD$.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i - I_i + ET_{rc,i} + DP_i \quad (18)$$

em que: $D_{r,i}$ é a depleção na zona radicular ao término do dia i (mm); $D_{r,i-1}$ é o conteúdo de água na zona radicular ao término do dia anterior (mm); P_i é a precipitação no dia i (mm); I_i é a lâmina de irrigação líquida no dia i (mm); $ET_{rc,i}$ é a evapotranspiração real da cultura no dia i (mm); DP_i é a perda de água fora da zona radicular por percolação profunda no dia i (mm).

O excesso de água por percolação profunda após uma chuva ou irrigação pesada foi estimado pela Equação 19. Enquanto o conteúdo de água do solo na zona radicular está abaixo da capacidade de campo, o solo não drena e $DP_i = 0$. O excesso de água de irrigação foi obtido separadamente como $\text{Max}(DP_i - P_i; 0)$ e o excesso de chuva como $DP_i - \text{Exc de } I_i$.

$$DP_i = P_i + I_i - ET_{rc,i} - D_{r,i-1} \quad (19)$$

O armazenamento de água no sistema radicular da cultura no dia i (ARM_i) foi calculado (Equações 20 e 21) considerando-se o armazenamento do dia anterior e o limite do solo em armazenar água (CAD), em que ALT_i é a alteração do armazenamento da água do solo no dia i (mm). Para iniciar a simulação do balanço de água no solo, considerado-se que o ARM era igual a CAD na data de plantio e no corte da cana-de-açúcar.

$$ALT_i = P_i + I_i - ET_{rc,i} \quad (20)$$

$$ARM_i = \begin{cases} \text{máx}(ARM_i, 0); & \text{para } ARM_{i-1} + ALT_i < 0 \\ \text{máx}(ARM_i, CAD); & \text{para } ARM_{i-1} + ALT_i > 0 \end{cases} \quad (21)$$

em que: ARM_i é o armazenamento de água na zona radicular ao término do dia i (mm); ARM_{i-1} é o conteúdo de água na zona radicular ao término do dia anterior (mm); P_i é a precipitação no dia i (mm); I_i é a lâmina de irrigação líquida no dia i (mm) e $ET_{rc,i}$ é a evapotranspiração real da cultura no dia i (mm).

As planilhas do balanço de água no solo e do método de Kc dual foram criadas no programa Microsoft Office Excel 2007 e os gráficos foram gerados nos softwares Microcal Origin 6.0 e SigmaPlot 10.0.

4.3. Índice de satisfação das necessidades de água e evapotranspiração relativa

O Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) foi calculado apenas para o tratamento de sequeiro em todo o ciclo de produção da cultura e a evapotranspiração relativa da cultura (ER) no período seco foi calculada para todos os tratamentos, ambos definidos como a razão entre a Evapotranspiração real (ET_r) e a Evapotranspiração máxima (ET_c) da cultura, conforme a Equação 22:

$$ISNA \text{ e } ER = \frac{ET_r}{ET_c} \quad (22)$$

Conforme [Silva et al. \(2013\)](#), se o ISNA fosse maior ou igual a 0,65, a cultura estaria exposta a um baixo risco climático. Com valores no intervalo $0,55 \leq ISNA < 0,65$, o grau de risco climático seria médio e para ISNA menor que 0,55, a cultura da cana-de-açúcar de sequeiro estaria exposta a um alto risco climático.

4.4. Variáveis de produção

A produtividade agrícola ($Mg \text{ ha}^{-1}$, TCH) foi estimada pesando-se as fileiras duplas das parcelas utilizando-se, para isso, um dinamômetro com capacidade para pesar até 100 kg. As análises das características agroindustriais dos colmos, necessárias para o cálculo dos açúcares totais recuperáveis (ATR), foram feitas no laboratório da Usina Santa Clotilde localizada em Rio Largo-AL.

Os valores de ATR foram estimados conforme a fórmula adotada pelo CONSECANA de Alagoas e Pernambuco (Equação 23).

$$ATR_{AL,PE} = 9,36814 \times PC + 8,9 \times ARC \quad (23)$$

em que:

ATR – é a quantidade de açúcares totais recuperáveis presentes no colmo (kg Mg⁻¹ de cana)

PC – é a pol da cana (%) e ARC (%) é o valor dos açúcares redutores da cana.

A produtividade agrícola e a agroindustrial da cultura em função das lâminas brutas de irrigação foram submetidas ao teste F e, posteriormente, feita a análise de regressão.

4.5. Função de resposta

A função de resposta da cultura às lâminas de irrigação foi obtida por curvas de regressão polinomial quadrática com a variável independente (lâmina de irrigação) de acordo com a Equação 24:

$$Y = b_0 + b_1 L - b_2 L^2 \quad (24)$$

em que:

Y – é a produtividade agrícola (Mg ha⁻¹) e agroindustrial da cultura (kg Mg⁻¹ de cana)

L – é a lâmina de irrigação total utilizada (mm)

b₀, b₁ e b₂ – são os coeficientes da equação.

A equação utilizada para estimar a lâmina de irrigação que proporciona a produtividade máxima foi deduzida igualando-se a zero a primeira derivada da função de produção, conforme as Equações 25 e 26:

$$Y' = b_1 - 2b_2 L \quad \therefore b_1 - 2b_2 L = 0 \quad \therefore -2b_2 L = -b_1 \quad (25)$$

$$L_{máx.} = -\frac{b_1}{2b_2} \quad (26)$$

em que:

L_{máx.} – é a lâmina total de irrigação que proporciona máxima produtividade agrícola e agroindustrial (mm). Posteriormente, a produtividade máxima (Y_{máx.}, Mg ha⁻¹) foi estimada substituindo-se L por L_{máx.} na Equação 24.

4.6. Produtividade de máxima eficiência econômica

Para a análise econômica da produção foram utilizados os custos de produção e o preço de venda do produto. Os custos foram divididos em custos fixos (custo operacional de produção da cana-de-açúcar) e custo variável (lâmina bruta de irrigação de cada tratamento) cujos valores foram utilizados no cálculo da Margem de Contribuição Agrícola (receita líquida), obtida pela Equação 27:

$$MCA = P_y Y - (P_x L + C_{op}) \quad (27)$$

em que:

MCA – é a margem de contribuição agrícola (R\$ ha⁻¹)

Y – é a produtividade de colmos (Mg ha⁻¹)

P_y – é o preço da megagrama de cana entregue na indústria (R\$ Mg⁻¹)

P_x – é o custo do milímetro de água para irrigação por gotejamento (R\$ mm⁻¹)

L – é a lâmina bruta total de irrigação

C_{op} – é o custo operacional de produção da cana-de-açúcar (R\$ ha⁻¹)

A MCA foi convertida em US\$ ha⁻¹, com dólar comercial equivalente a R\$ 2,20, conforme a BOVESPA, no dia 01 de julho de 2014.

Os preços do kg de ATR usados para o cálculo de remuneração foram três valores padronizados devido à variação nas safras. Os valores do custo do milímetro de água, do custo anual de produção da cana-de-açúcar e do custo de corte, carregamento e transporte (CCT) utilizados nos cálculos foram obtidos em empresas que utilizam sistemas de irrigação por gotejamento e têm os custos de produção monitorados por programas de computadores (Tabela 4). O custo operacional de produção da cana-de-açúcar foi considerado como a soma entre o custo de plantio, tratamentos culturais e o custo do CCT de cada ciclo de cultivo. O custo de plantio foi diluído no custo anual de produção da cultura considerando-se 10 anos de vida útil ou 10 colheitas sem renovação do canavial. O custo total do CCT em cada ciclo variou conforme a produtividade média estimada. No cálculo do custo do milímetro de água foram considerados 10 anos o período de amortização para o capital empregado no sistema de irrigação o que, teoricamente, corresponde à sua vida útil no campo.

Tabela 4. Custo do milímetro de água para irrigação por gotejamento, custos com plantio, tratos culturais, corte, carregamento e transporte (CCT) e preço dos açúcares totais recuperáveis (ATR).

Descrição	R\$ mm ⁻¹	%	R\$ ha ⁻¹
Infraestrutura hidráulica/Edificações (amortização em 20 anos)	0,25	6,4	
Sistema de irrigação (amortização em 10 anos)	1,16	29,7	
Custo operacional anual da irrigação	2,50	63,9	
Custo anual total da irrigação	3,91	100,0	
Plantio (amortização em 10 anos)			500,00
Custo anual com tratos culturais			1.300,00
Custo de corte, carregamento e transporte - CCT (R\$ t ⁻¹): 17,00			
Custo anual de produção (Plantio + tratos culturais + CCT):			
Cana-planta com TCH médio de 160,3 t ha ⁻¹			4.525,10
1ª Soca com TCH médio de 130,4 t ha ⁻¹			4.016,80
2ª Soca com TCH médio de 101,1 t ha ⁻¹			3.018,70
Preço do ATR (R\$ kg ⁻¹): 0,30; 0,55 e 0,80			
ATR médio entre os tratamentos: 145,7 kg Mg ⁻¹ (cana-planta)			
147,7 kg Mg ⁻¹ (1ª soca)			
144,2 kg Mg ⁻¹ (2ª soca)			

O valor da cana entregue na indústria (P_y) foi calculado conforme a Equação 28:

$$P_y = ATR \times \text{Preço do ATR} \quad (28)$$

O valor da quantidade de ATR (kg Mg⁻¹) utilizado foi a média estimada entre os tratamentos para cada ciclo de cultivo, pois não houve variação em função das lâminas de irrigação devido ao estresse hídrico provocado para a maturação.

A lâmina de irrigação de máxima eficiência econômica ($Máx_{ec}$) foi estimada pela Equação 29:

$$L_{ec} = \frac{P_x - P_y b_1}{2P_y b_2} \quad (29)$$

em que:

L_{ec} – é a lâmina que proporciona a produtividade ótima econômica (mm)

P_x – é o custo do milímetro de água para irrigação por gotejamento (R\$ mm⁻¹)

P_y – é o preço da megagrama de cana entregue na indústria (R\$ Mg⁻¹)

b_1 e b_2 – são os coeficientes da função de produção

Posteriormente, a produtividade de máxima eficiência econômica ($Máx_{ec}$) foi estimada substituindo-se L por L_{ec} na Equação 24.

As funções de produção foram ajustadas no software Sisvar e os gráficos foram gerados nos softwares Microcal Origin 6.0 e SigmaPlot 10.0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Variáveis agrometeorológicas

A precipitação pluvial durante o 1º ciclo de produção da cultura (12/01/2009 a 22/02/2010 – 406 dias) somou 2.208 mm, mas 63% (1.384 mm) dessa chuva ocorreram entre os meses de abril e agosto de 2009, com média de $9,0 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 6A). O mês de maio de 2009 foi o mais chuvoso com total de 454 mm; no 2º ciclo de produção (23/02/2010 a 28/02/2011 – 371 dias) a chuva total foi 1.952 mm; porém, 1.180 mm (60% do total) foram registrados durante a estação chuvosa (de abril a agosto de 2010). O mês de junho de 2010 foi o mais chuvoso de todo o período analisado, com 579 mm, em que apenas no dia 4 desse mês foram registrados 186 mm (quase 10% do total no ciclo); no 3º ciclo de produção (29/02/2011 a 20/02/2012 – 357 dias) o total de chuva foi 1.915 mm, mas 75% desse total (1.446 mm) foram observados entre abril e agosto de 2011, em que o mês de abril foi o mais chuvoso com 404 mm; nos três ciclos de cultivo, em média 66% da chuva ocorreram entre os meses de abril e agosto, caracterizando distribuição irregular da precipitação pluvial durante o ano.

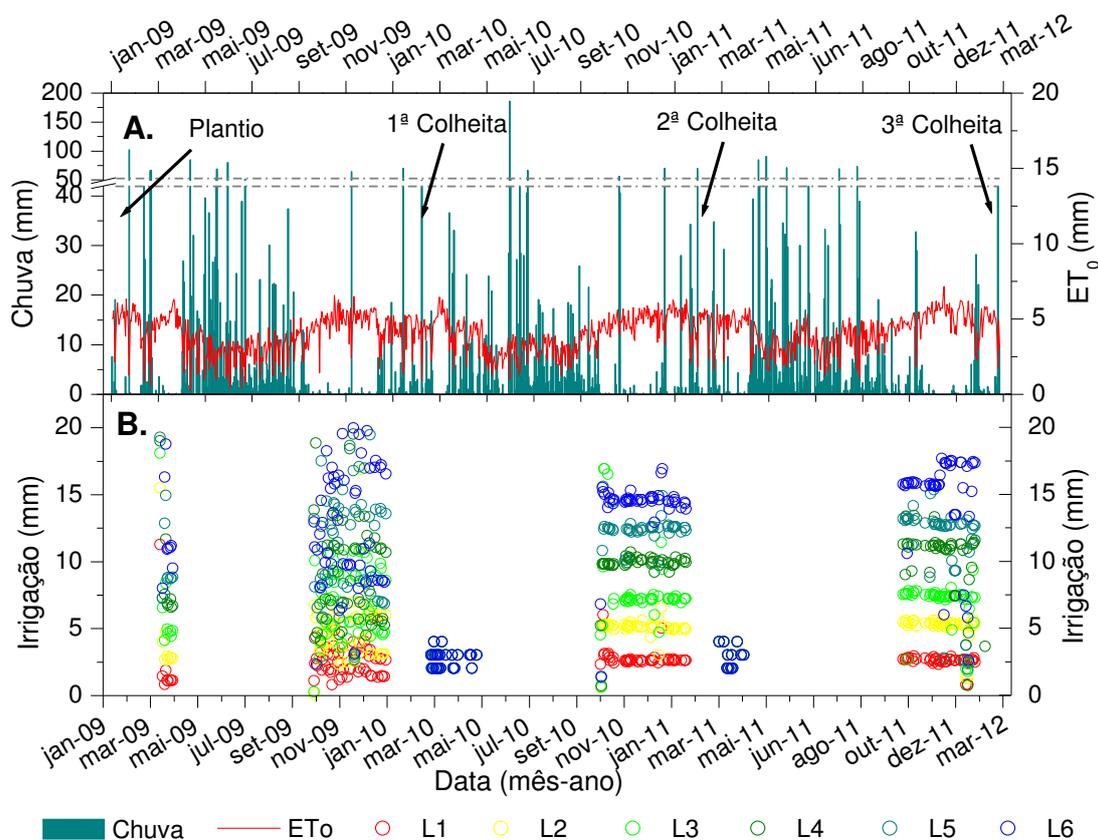


Figura 6. A: Valores diários de chuva, evapotranspiração de referência (ET₀); B: lâminas de irrigação (L0, L1, L2, L3, L4, L5 e L6), durante três ciclos de cultivo da cana-de-açúcar no período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2012, na região de Rio Largo-AL.

Conforme Souza et al. (2004), na zona canavieira alagoana a precipitação pluvial normal é 1.300 mm por ano e na região de Rio Largo a média anual é 1.800 mm, sendo que aproximadamente 70% das chuvas se concentram no período de abril a agosto (estação chuvosa). Sendo assim, há grande probabilidade de ocorrer déficit hídrico em cultivos de sequeiro durante os meses de outubro a fevereiro. Carvalho et al. (2013b), concluíram que a estação chuvosa na região de Rio Largo-AL se inicia, a 80% de probabilidade, em abril e termina em outubro. Mesmo durante a estação chuvosa, às vezes há períodos sem chuva superiores a 7 dias que provocam pequenos estresses hídricos nas plantas (Carvalho et al., 2013a).

A evapotranspiração de referência (ET_0) total no 1º ciclo de cultivo foi 1.616 mm, com mínima de 0,3 mm dia⁻¹ (22 de abril de 2009), máxima de 6,6 mm dia⁻¹ (23 de outubro de 2009) e média de 4,0 mm dia⁻¹ (Figura 6A); no 2º ciclo de cultivo a ET_0 somou 1.481 mm, com mínima de 1,0 mm dia⁻¹ (04 de junho de 2010, quando houve chuva de 186 mm), máxima de 6,5 mm dia⁻¹ (06 de março de 2010) e média de 4,0 mm dia⁻¹; no 3º ciclo de produção da cultura o total da ET_0 foi 1.493 mm, com mínima de 1,1 mm dia⁻¹ (25 de agosto de 2011), máxima de 7,2 mm dia⁻¹ (11 de dezembro de 2011) e média de 4,2 mm dia⁻¹. Observam-se valores maiores de ET_0 entre setembro e fevereiro e menores entre abril e agosto, ou seja, a demanda atmosférica é menor no período em que a precipitação pluvial é maior e mais frequente, o que causa alta nebulosidade e diminui a intensidade da radiação solar e o aquecimento da atmosfera.

A irrigação nos três ciclos de cultivo foi iniciada ainda na 1ª fase de desenvolvimento da cultura (mês de março), devido à falta de chuvas nesse período para suprir a demanda hídrica das plantas (Figura 6B). As lâminas de irrigação diferenciadas foram aplicadas no período compreendido entre o final da fase de crescimento e o início da fase final (maturação) da cultura, ou seja, entre os meses de outubro e janeiro, quando houve redução do armazenamento de água no solo e aumento da evapotranspiração da cultura. Os valores médios diários das lâminas líquidas aplicadas foram 2,2, 4,4, 6,0, 9,0, 10,7 e 12,9 mm em L1, L2, L3, L4, L5 e L6, respectivamente.

No primeiro dia de cada ciclo de produção da cultura (1 dia após o plantio e após o corte) o valor do armazenamento de água no solo (ARM) a 30 cm de profundidade foi igual ao da capacidade de água disponível (CAD = 29,1 mm), em virtude da irrigação feita neste período (Figura 7). Na fase inicial do primeiro ano de cultivo (1-60 DAP) as chuvas foram suficientes para manter a umidade do solo acima do limite da água facilmente disponível (AFD); porém, no início da fase de crescimento não houve chuvas e o ARM começou a diminuir, de modo que aos 69 dias após o plantio (DAP) teve valor de 11,9 mm, sendo menor que a AFD (12,2 mm). Com isto, foi notória a necessidade de irrigação para suprir o déficit hídrico nos tratamentos irrigados. A partir dos 89 DAP iniciou-se o período chuvoso e o ARM aumentou, permanecendo próximo à CAD durante o restante da fase de crescimento.

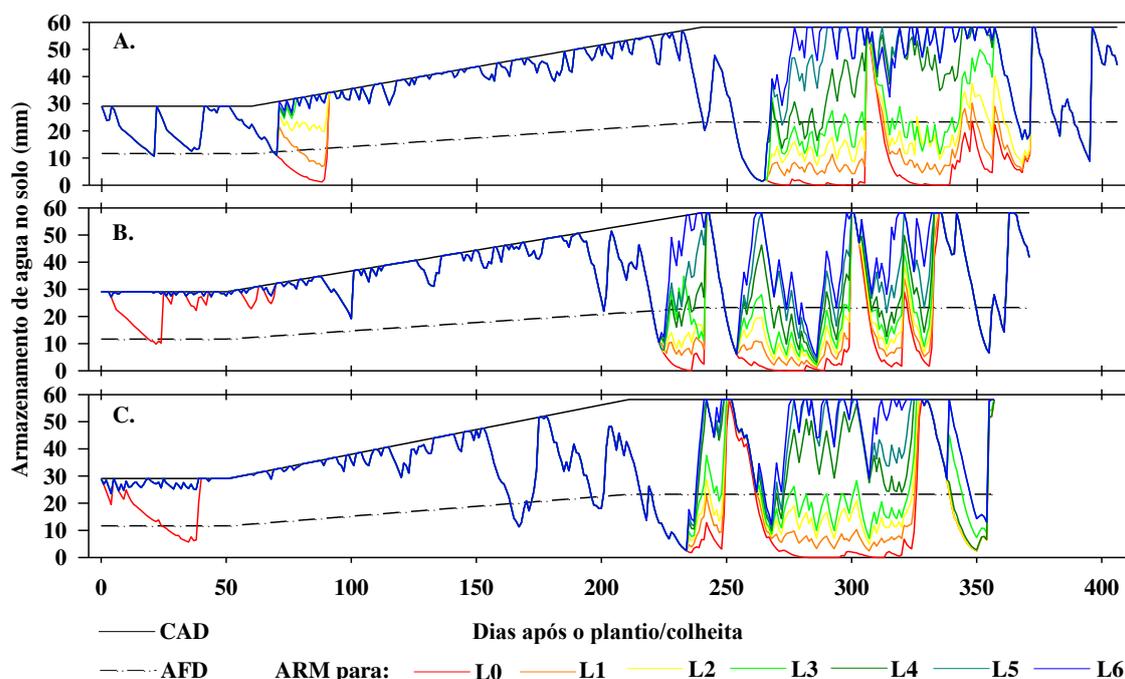


Figura 7. Valores diários da capacidade de água disponível (CAD), limite da água facilmente disponível (AFD) e armazenamento de água no solo (ARM) para tratamentos com diferentes lâminas de irrigação (L0, L1, L2, L3, L4, L5 e L6) em cultivos da cana-de-açúcar nos anos de 2009 (A), 2010 (B) e 2011 (C), na região de Rio Largo-AL.

Na fase de crescimento (61-240 DAP no 1º ciclo, 51-240 DAC no 2º ciclo e 51-210 DAC no 3º ciclo) o ARM esteve próximo da CAD na maior parte deste período; entretanto, em algumas ocasiões o ARM foi menor que a AFD; a partir dos 266 DAP do 1º ciclo, dos 224 e 235 DAC do 2º e 3º ciclo de cultivo, respectivamente, observou-se que em todos os tratamentos o armazenamento de água no solo esteve abaixo do limite crítico de umidade ($ARM < AFD$), ocorrência que se deve à baixa frequência de chuvas no período e também porque não havia começado a irrigação, razão pela qual a cultura esteve em condições de déficit de água e foi necessário iniciar a aplicação das lâminas de irrigação dos tratamentos.

Na fase intermediária (241-346 DAP no 1º ciclo, 241-320 DAC no 2º ciclo e 211-307 DAC no 3º ciclo), quando a cultura estava em crescimento máximo, foi aplicada a maior parte das lâminas de irrigação dos tratamentos e se observou que nos tratamentos com as menores lâminas de irrigação, o déficit de água foi de grande intensidade.

Na fase final, a irrigação foi suspensa aos 31, 38 e 27 dias antes da colheita nos 1º, 2º e 3º anos de cultivo, respectivamente, visto que a proximidade da colheita exige estresse hídrico para induzir as plantas à maturação, ou seja, diminuir o crescimento vegetativo e intensificar o processo de acúmulo de açúcar (Topppa et al., 2010).

Os valores diários de ET_c e ET_r estão apresentados na Figura 8, na qual se observa que, à medida em que a cultura foi aumentando a área foliar, a área de solo exposta foi reduzindo e diminuindo a evaporação direta, ou seja, a evapotranspiração passou a ser representada, em maior parte, pela transpiração porque a área foliar se tornou mais significativa. A ET_r média diária da fase inicial foi 1,51 mm dia⁻¹ no 1º ciclo, 1,77 mm dia⁻¹ no 2º e 1,76 mm dia⁻¹ no 3º ciclo nos tratamentos com irrigação, estando 30, 15 e 20%, respectivamente, abaixo da demanda máxima da cultura (ET_c , que foi 2,16, 2,09 e 2,19 mm dia⁻¹ nos 1º, 2º e 3º ciclos, respectivamente), fato que ocorreu porque as lâminas teóricas usadas na estimativa da ET_c fizeram a evaporação aumentar; com isto, a ET_c foi maior que a ET_r dos tratamentos; no entanto, as lâminas aplicadas nos tratamentos durante a fase inicial foram suficientes para garantir a transpiração das plantas; no sequeiro, a média evapotranspirada foi 1,51 mm dia⁻¹ no 1º ciclo, 1,53 mm dia⁻¹ no 2º e 1,58 mm dia⁻¹ no 3º ciclo, sendo 30, 27 e 28% menor que a ET_c , respectivamente.

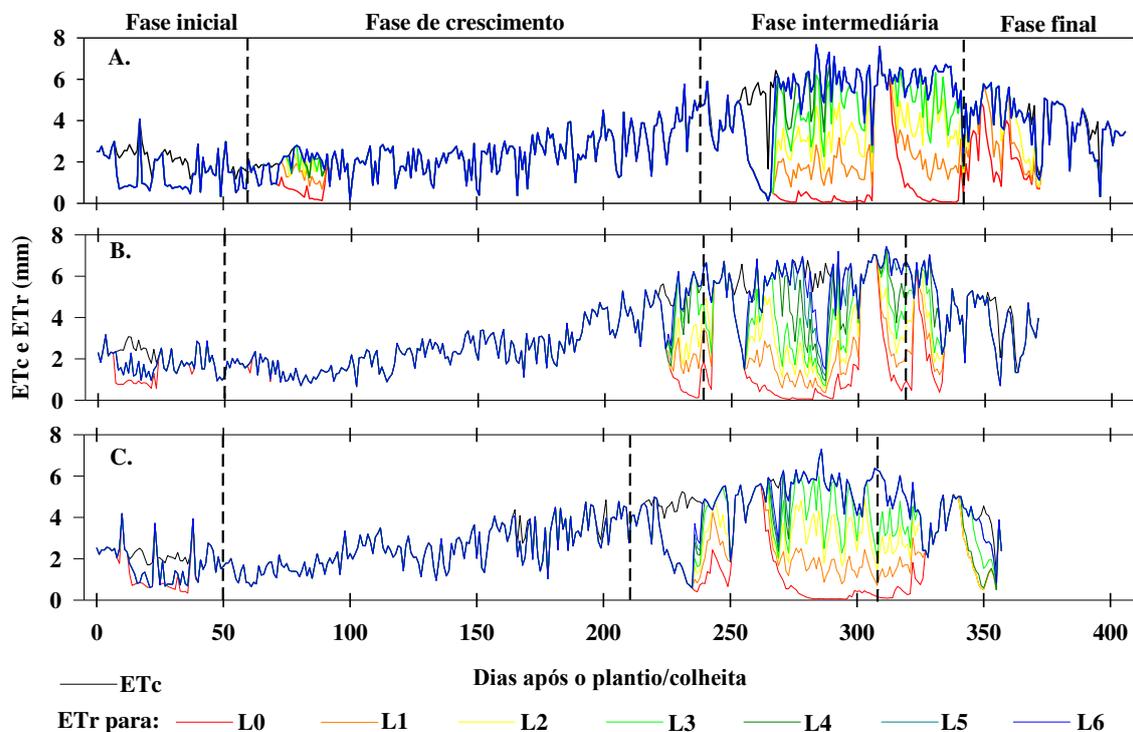


Figura 8. Valores diários da evapotranspiração da cultura (ET_c) e evapotranspiração real da cana-de-açúcar (ET_r) para tratamentos com diferentes lâminas de irrigação (L0, L1, L2, L3, L4, L5 e L6) nas safras de 2009/2010 (A), 2010/2011 (B) e 2011/2012 (C), na região de Rio Largo-AL.

No presente caso, como o sistema de irrigação usado foi o gotejamento, não se recomenda a aplicação de lâmina diária superior a 2 mm durante a fase inicial (até 60 DAP ou DAC), em função da limitação da ET_r . A aplicação de lâminas superiores resulta em perda de água por drenagem devido à diferença entre o ARM e a CAD, além de que a diminuição da frequência de irrigação, isto

é, o aumento do turno de rega para períodos superiores a 3 dias, causa déficit de água no solo, pois nos dias sem irrigação há a demanda de água para suprir a ET_r . Portanto, caso precise aumentar o turno de rega, recomenda-se manejar a irrigação aplicando uma lâmina de 6 mm a cada 3 dias para manter a umidade do solo próximo à capacidade de campo durante a fase inicial, sendo que no início o ARM deve estar igual ou muito próximo ao valor da CAD.

Entre os 71 e 87 DAP, ocorreu um período sem chuvas e, com isto, foram aplicadas algumas lâminas de irrigação até que iniciasse a época de chuvas. Quando do início do período chuvoso na fase de crescimento, as chuvas médias de 10,0, 9,6 e 9,0 mm dia⁻¹ ocorridas durante os 1º, 2º e 3º ciclos, respectivamente, foram responsáveis pela reposição da umidade do solo e fizeram a ET_r de todos os tratamentos se igualar à ET_c durante a época de chuvas.

Quando praticamente não houve mais chuvas, o armazenamento de água no solo diminuiu e o consumo diário de água pela cultura não foi totalmente suprido, reduzindo os valores da ET_r . Assim, aos 266 DAP do 1º ciclo e aos 224 e 235 DAC do 2º e 3º ciclos de cultivo, respectivamente, foi preciso iniciar a irrigação diferenciada de acordo com os respectivos tratamentos. Na fase de crescimento do 1º ciclo a ET_r , no tratamento de sequeiro, variou de 0,13 a 5,76 mm dia⁻¹ e, nos demais tratamentos, de 0,15 a 5,76 mm dia⁻¹; no 2º ciclo a ET_r variou de 0,11 a 5,34 mm dia⁻¹ no tratamento de sequeiro, de 0,66 a 5,34 mm dia⁻¹ em L1 e L2, de 0,66 a 6,21 mm dia⁻¹ em L3, e de 0,66 a 6,67 mm dia⁻¹ em L4, L5 e L6; no 3º ciclo a ET_r variou de 0,65 a 4,77 mm dia⁻¹ em todos os tratamentos.

Na fase intermediária a ET_r foi influenciada em maior proporção pela transpiração porque o dossel da cultura já estava completamente fechado. Como nesta fase houve baixa precipitação pluvial e foi aplicada a maior parte das lâminas de irrigação diferenciadas, pode-se observar que o déficit de água afetou bastante a transpiração da cultura em que, para as menores lâminas, houve redução da ET_r . A ET_r dos tratamentos L6 e L5 foi inferior à ET_c em alguns dias devido a paradas na irrigação ocasionadas por problemas operacionais. A média de ET_r da fase intermediária dos três ciclos foi 1,73, 2,59, 3,44, 4,10, 4,74, 4,96 e 5,04 mm dia⁻¹ nos tratamentos com L0, L1, L2, L3, L4, L5 e L6, respectivamente. A ET_c média da fase intermediária nos 1º, 2º e 3º ciclos de cultivo foi 5,48, 6,01 e 5,10 mm dia⁻¹, com média geral de 5,53 mm dia⁻¹. Considerando a média geral da ET_c na fase intermediária dos três ciclos (5,53 mm dia⁻¹), se não houvesse irrigação neste período, em 6 dias o consumo de água pela planta faria o ARM decrescer da CAD (58,2 mm) ao limite da AFD (23,3 mm).

Os valores de ET_r observados em cada tratamento e ET_c , durante a fase intermediária, estão sujeitos a variações anualmente, mas, devido à baixa amplitude dessas variações, os mesmos podem ser tomados como referência para se fazer o manejo da irrigação na cana-de-açúcar. Como é comum entre os produtores do Nordeste priorizar as áreas irrigadas por gotejamento para colher no final da

safra, a fase intermediária de desenvolvimento da cultura coincide com o período seco e a necessidade hídrica da planta é semelhante à encontrada neste trabalho.

Na última fase do ciclo de produção da cultura a tendência da ET_r foi de decréscimo, em virtude da suspensão da irrigação e à moderada magnitude e frequência das chuvas nesta fase. A ET_r teve valor de 3,47, 3,98 e 2,37 mm para todos os tratamentos na véspera da colheita nos 1º, 2º e 3º ciclos de produção, respectivamente, de vez que, devido à suspensão da irrigação, todos os tratamentos ficaram nas mesmas condições de umidade.

[Silva et al. \(2012b\)](#) observaram, estudando o requerimento hídrico da cana-soca irrigada, variedade RB92579, cultivada na região semiárida do Submédio do Vale do São Francisco, que na fase de brotação e estabelecimento da cultura a ET_c oscilou em torno de 3,0 mm dia⁻¹; na fase de estabelecimento e perfilhamento, o valor médio da ET_c aumentou para 3,8 mm dia⁻¹; na fase de crescimento máximo os valores da evapotranspiração da cultura atingiram, em média, 5,1 mm dia⁻¹, destacando-se como o mais elevado do ciclo produtivo da cana-de-açúcar; na fase de maturação da cultura, em que ocorreu a suspensão da irrigação para promover o acúmulo de sacarose nos colmos e em consequência, a redução do IAF, os valores da ET_c decresceram, para média de 3,1 mm dia⁻¹.

Em sua revisão bibliográfica, esses autores citam pesquisadores que estudaram a evapotranspiração da cana-de-açúcar em diferentes regiões do mundo e observaram que, a depender da variedade, do local de cultivo e do sistema de produção, os valores mínimos, médios e máximos de ET_c variam de 0,52 a 4,10, 2,33 a 5,70 e de 3,70 a 8,60 mm dia⁻¹, respectivamente. [Thompson & Boyce \(1967\)](#) realizaram medições em lisímetros com cana-de-açúcar cultivada sob as condições climáticas de Pongola, na África do Sul, e obtiveram valor máximo de ET_c igual a 6,8 mm dia⁻¹.

Os 1º, 2º e 3º ciclos de cultivo, com duração de 406, 371 e 357 dias, apresentaram 2.208, 1.952 e 1.915 mm de precipitação pluvial total, respectivamente; no entanto, nos 1º, 2º e 3º ciclos, a chuva efetiva variou de 705 a 834 mm, de 611 a 841 mm e de 609 a 762 mm no tratamento L6 e no sequeiro, respectivamente (Tabela 5). As lâminas de irrigação variaram de 157 a 873 mm, de 127 a 734 mm e de 117 a 707 mm entre L1 a L6, nos 1º, 2º e 3º ciclos, respectivamente, durante os quais a lâmina total efetiva aplicada nos tratamentos irrigados se manteve no intervalo de 981 a 1.578 mm, de 906 a 1.345 mm e de 837 a 1.316 mm, respectivamente.

Tabela 5. Valores totais de chuva efetiva (P_{efet}), irrigação, P_{efet} mais irrigação, evapotranspiração real da cultura (ET_r), evapotranspiração relativa (ER), produtividade de colmos (TCH) e açúcares totais recuperáveis (ATR) para os tratamentos nas safras de 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012, na região de Rio Largo-AL.

Cana-planta, 2009-2010, 406 dias, chuva total de 2.208 mm							
Tratamento	P_{efet}	Irrigação	P_{efet} + Irrigação (mm)	ET_r	ER (ET_r/ET_c)	TCH (Mg ha ⁻¹)	ATR (kg Mg ⁻¹)
L0	834	0	834	829	0,21	118,0	146,6
L1	824	157	981	974	0,44	141,2	146,5
L2	805	312	1.117	1.111	0,67	160,0	149,8
L3	777	447	1.224	1.212	0,83	160,6	145,1
L4	727	585	1.312	1.279	0,96	173,1	146,6
L5	707	741	1.448	1.295	0,98	180,6	144,0
L6	705	873	1.578	1.296	0,99	188,4	141,6
1ª Soca, 2010-2011, 371 dias, chuva total de 1.952 mm							
Tratamento	P_{efet}	Irrigação	P_{efet} + Irrigação (mm)	ET_r	ER (ET_r/ET_c)	TCH (Mg ha ⁻¹)	ATR (kg Mg ⁻¹)
L0	841	0	841	841	0,27	112,3	146,7
L1	779	127	906	947	0,41	120,3	148,2
L2	761	240	1.001	1.030	0,55	125,9	150,9
L3	751	346	1.097	1.111	0,68	135,6	148,9
L4	715	473	1.188	1.191	0,82	138,7	148,8
L5	663	587	1.250	1.236	0,92	135,8	145,4
L6	611	734	1.345	1.254	0,95	144,4	145,9
2ª Soca, 2011-2012, 357 dias, chuva total de 1.915 mm							
Tratamento	P_{efet}	Irrigação	P_{efet} + Irrigação (mm)	ET_r	ER (ET_r/ET_c)	TCH (Mg ha ⁻¹)	ATR (kg Mg ⁻¹)
L0	762	0	762	747	0,25	78,9	143,4
L1	720	117	837	853	0,45	92,9	144,8
L2	698	234	932	948	0,66	95,8	145,6
L3	677	347	1.024	1.037	0,81	104,0	147,3
L4	630	467	1.097	1.098	0,97	107,9	143,2
L5	610	572	1.182	1.127	0,98	108,0	140,8
L6	609	707	1.316	1.133	0,99	120,8	144,4

A evapotranspiração máxima da cultura (ET_c) somou 1.397, 1.329 e 1.223 mm, mas a ET_r variou de 829 a 1.296 mm, de 841 a 1.254 mm e de 747 a 1.133 mm no sequeiro e em L6, nos 1º, 2º e 3º ciclos, respectivamente. Esses valores totais indicam que o tratamento de sequeiro teve o Índice de Satisfação das Necessidades de Água da cultura (ISNA) igual a 0,59 (829/1397), 0,63 (841/1329) e 0,61 (747/1223) nos 1º, 2º e 3º ciclos, respectivamente, ou seja, conforme a classificação descrita por [Silva et al. \(2013\)](#), o cultivo de sequeiro esteve exposto a médio risco climático nos três anos. A evapotranspiração relativa (ER) de todos os tratamentos, calculada apenas para o período em que houve irrigação, oscilou de 0,21 a 0,99, de 0,27 a 0,95 e de 0,25 a

0,99 entre L0 a L6, nos 1º, 2º e 3º ciclos, respectivamente. As lâminas de irrigação dos tratamentos L1 e L2 somadas à chuva efetiva do período seco nos três ciclos de cultivo foram insuficientes e mantiveram a ER (média entre os ciclos de 0,45 e 0,66 para L1 e L2, respectivamente) abaixo do valor aceitável (0,75) determinado por [Roerink et al. \(1997\)](#) para cultivos irrigados.

[Oliveira et al. \(2012\)](#) observaram que mais de 73% da área do Nordeste estão classificadas como região de alto risco climático para o cultivo da cana-de-açúcar devido às irregularidades na distribuição de chuvas durante o ano; porém, a região próxima ao litoral possui baixo e médio risco climático para o cultivo em quase todos os meses do ano. Esta classificação climática em função do suprimento hídrico pode variar em uma mesma região. Dependendo da variabilidade climática de certo período do ano para o mesmo período do ano seguinte, o risco climático para determinada cultura pode sofrer alteração em sua classificação, visto que a evapotranspiração real pode ser menor que a evapotranspiração máxima da cultura tanto se houver diminuição da reposição hídrica pelas chuvas quanto se houver aumento da temperatura do ar.

[Teodoro et al. \(2009\)](#) mediram, estudando a cultura da cana-de-açúcar durante 420 dias em regime de sequeiro, precipitação pluvial de 1.825 mm, mas, do 3º decêndio de abril ao 1º decêndio de agosto de 2006 ocorreu excesso hídrico de 837 mm. Como a evapotranspiração máxima da cultura foi estimada em 2.068 mm, houve um déficit hídrico que poderia ser suprido totalmente se o excedente das chuvas fosse armazenado e utilizado para irrigação.

[Silva et al. \(2012b\)](#) encontraram requerimento hídrico total de 1.710 mm em cana-soca irrigada, variedade RB92579, cultivada na região semiárida do Submédio do Vale do São Francisco, durante 357 dias. Os autores observaram que o suprimento hídrico foi satisfatório visto que a ER foi de 0,92 ([Silva et al., 2011](#)). [Almeida et al. \(2008\)](#) estudaram a mesma variedade (RB92579) durante o segundo ciclo de cultivo sob as condições irrigadas da região de Rio Largo-AL e mediram evapotranspiração acumulada de 1.584 mm em 12 meses.

[Lyra et al. \(2007b\)](#) encontraram, pesquisando a ET_c da cana-planta em cultivo de sequeiro no período de outubro de 2000 a janeiro de 2002, na região climática de Maceió-AL, ET_r total de 1.180 mm em 450 dias com uso de K_c “dual”. Para a mesma época de cultivo, porém utilizando K_c “único”, [Lyra et al. \(2007a\)](#) determinaram ET_c total de 1.950 mm, sendo 65% superior ao valor obtido com o K_c “dual”. Esta diferença se deve ao fato de que o método “dual” contabiliza o déficit hídrico em períodos de seca e reduz a evaporação direta de água no solo, particularmente em cultivos de sequeiro e irrigado por gotejamento nos quais a evaporação exerce pouca influência na ET_r , indicando que o procedimento de estimativa da ET_r também deve ser escolhido em função do método de irrigação a ser utilizado. Além disto, para o manejo adequado da irrigação baseado na ET_r , os coeficientes da cultura devem ser ajustados às condições climáticas locais em cada fase de

desenvolvimento, sobretudo na fase inicial em que há predominância da evaporação direta da água do solo.

5.2. Produtividade da cana-de-açúcar

Os valores de produtividade em função das lâminas de irrigação submetidos ao teste F foram significativos a nível de 1% de probabilidade de erro. As equações matemáticas utilizadas como funções de produção apresentaram ajuste significativo dos coeficientes apenas para TCH, em que o coeficiente de determinação da equação (R^2) foi de 98, 95 e 95% nos 1º, 2º e 3º ciclos de cultivo (Tabela 6). Como não houve ponto de máximo seguido de decréscimo no intervalo de TCH estudado neste trabalho, os coeficientes de segundo grau da equação de regressão não foram significativos, mas o estudo da função de segundo grau se tornou confiável devido ao comportamento de menores acréscimos (menor produto marginal físico) de TCH próximo ao ponto com a máxima lâmina de irrigação.

Tabela 6. Modelos matemáticos para estimativa da produtividade de colmos (TCH) e de açúcares totais recuperáveis (ATR) da cana-de-açúcar, em função de lâminas de irrigação (L) na cana-planta (safra 2009/2010), 1ª soca (safra 2010/2011) e 2ª soca (safra 2011/2012) na região de Rio Largo-AL.

Produtividade de colmos (TCH) em Mg ha ⁻¹		
Cana-planta	$TCH = 120,5559^{**} + 0,1261^{**} L - 0,000058097^{ns} L^2$	$R^2 = 0,98$
1ª Soca	$TCH = 112,1860^{**} + 0,0737^{*} L - 0,000043826^{ns} L^2$	$R^2 = 0,95$
2ª Soca	$TCH = 81,5167^{**} + 0,0683^{*} L - 0,000023709^{ns} L^2$	$R^2 = 0,95$
Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) em kg Mg ⁻¹		
Cana-planta	$ATR = 146,4196^{**} + 0,0091^{ns} L - 0,000016779^{ns} L^2$	$R^2 = 0,75$
1ª Soca	$ATR = 147,1734^{**} + 0,0139^{ns} L - 0,000023209^{ns} L^2$	$R^2 = 0,63$
2ª Soca	$ATR = 144,0858^{**} + 0,0068^{ns} L - 0,00001273^{ns} L^2$	$R^2 = 0,18$

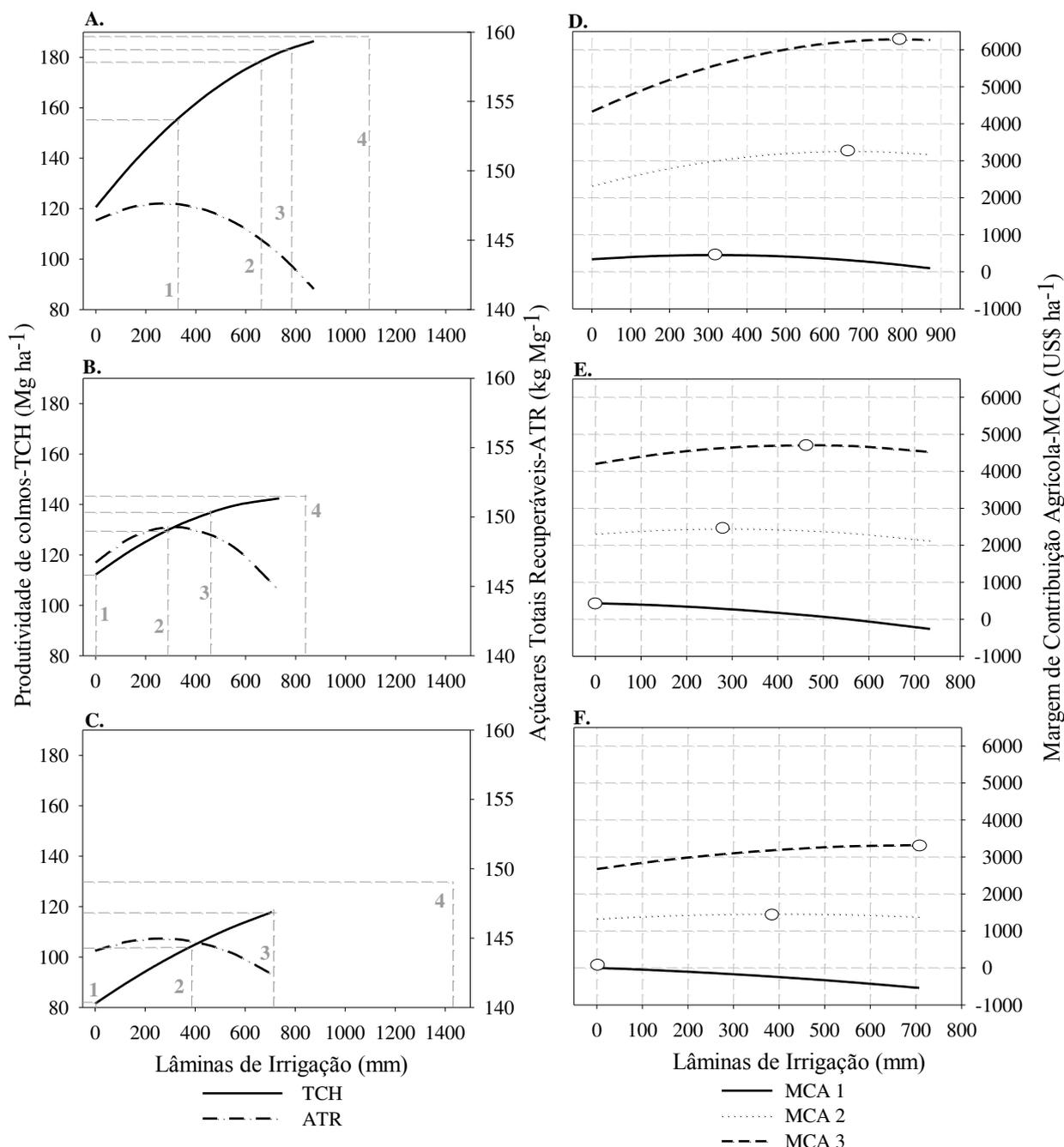
ns, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t.

A escolha da equação de regressão adequada deve ser feita pelas propriedades matemáticas da função em representar o comportamento usual da cultura e não apenas pelo maior coeficiente de determinação. Conforme alguns autores (Lyra et al., 2008; Silva et al., 2008; Albuquerque Filho et al., 2009; Alencar et al., 2009; Santana et al., 2009; Lima Júnior et al., 2010; Oliveira et al., 2011), o polinômio de segundo grau é uma das equações matemáticas mais utilizadas como função de produção; no entanto, as funções de produção devem, em geral, ser usadas em intervalos convenientes, isto é, sem exceder níveis do insumo economicamente razoáveis. A função de segundo grau representa bem a resposta de uma cultura agrícola a insumos na parte ascendente da curva, mas na região estacionária ou decrescente representa mal, pois, normalmente, os acréscimos

na produtividade da cultura são grandes próximo ao nível 0 (zero) do insumo, mas, ao passar pelo retorno máximo, a produtividade decresce lentamente, o que não ocorre com a função de segundo grau. Além disto, pode ocorrer que o ponto de máximo retorno físico estimado pela equação esteja além do nível máximo de insumo usado no experimento, caracterizando extrapolação, a qual não é recomendável utilizar; neste caso, deve-se estudar a função de produção dentro dos intervalos do ensaio, pois a produtividade máxima geralmente é maldeterminada e nem sempre é possível se obter, sendo mais importante a obtenção da receita líquida máxima relativa ao insumo em estudo; por outro lado, o produtor deve atentar para o fato de que a lâmina econômica depende da relação de preços do milímetro de água (P_x) e da Mg de cana (P_y) e não dos preços propriamente, ou seja, quando o mm se torna mais caro em relação à Mg de cana por mm, a lâmina econômica decresce.

As curvas de regressão polinomial quadrática para produtividade agrícola e quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) por tonelada de cana em função da lâmina de irrigação bruta total nos três ciclos de cultivo estão apresentadas nas Figuras 9A, 9B e 9C. A produtividade agrícola entre L0 e L6 variou de 120 a 186 Mg ha⁻¹, de 112 a 142 Mg ha⁻¹ e de 81 a 117 Mg ha⁻¹, nos 1º, 2º e 3º ciclos de cultivo, respectivamente. A diferença de produtividade entre o tratamento de sequeiro e o irrigado com a maior lâmina foi de 65, 30 e 36 Mg ha⁻¹, correspondente a 55, 27 e 45% da produtividade agrícola da cana-de-açúcar sem irrigação (sequeiro) nos 1º, 2º e 3º ciclos de produção, respectivamente.

A resposta da cana-de-açúcar à irrigação foi maior nos menores tratamentos; por exemplo, nos 1º, 2º e 3º ciclos, entre L0 e L1 a cultura produziu em média 117, 69 e 66 kg de colmos por mm de água de irrigação, enquanto entre L5 e L6 a resposta foi de 32, 15 e 38 kg de colmos mm⁻¹, respectivamente. Conforme a lei dos rendimentos decrescentes, a qual corresponde à análise de resposta pelo princípio agrônômico conhecido como “a lei do mínimo”, formulada por [Von Liebig \(1840\)](#), “a produtividade de qualquer cultura é governada por qualquer mudança na quantidade e qualidade do fator escasso, chamado de fator mínimo. E, à medida em que o fator mínimo é aumentado, a produtividade também aumenta na proporção da oferta daquele fator até outro fator se tornar mínimo”. Esta lei se aplica a todos os seres vivos; portanto, neste caso, como a umidade do solo nos tratamentos com maiores lâminas não foi mais o fator limitante do crescimento das plantas, a produtividade da cultura só aumentaria sob condições ótimas de nutrientes, temperatura do ar, luz, CO₂ e outros fatores de produção vegetal. A produtividade física máxima da cultura, estimada pela função de produção, seria 189,1, 142,8 e 130,2 Mg ha⁻¹, obtida com lâmina bruta de irrigação de 1.087, 825 e 1.424 mm nos 1º, 2º e 3º ciclos de produção, respectivamente; para produtividades acima desses valores, ou seja, com a cultura em condições ótimas de umidade no solo, é preciso recorrer a outras práticas agrícolas, como adubação, controle de pragas e doenças, além de outros.



Os pontos na curva de TCH marcados com 1, 2 e 3 e também MCA 1, MCA 2 e MCA 3 referem-se aos cálculos para os preços de ATR iguais a 0,30; 0,55 e 0,80 R\$ kg⁻¹, respectivamente; 4 é o ponto de máxima produtividade agrícola estimado pela função de produção.

Figura 9. Produtividade agrícola (TCH) e produtividade agroindustrial (ATR) nas safras 2009/10 (A), 2010/11 (B) e 2011/12 (C), além de margem de contribuição agrícola (MCA) em função de lâminas de irrigação na cana-de-açúcar nas safras 2009/10 (D), 2010/11 (E) e 2011/12 (F), na região de Rio Largo-AL.

A produtividade agrícola de máxima eficiência econômica foi calculada em função do custo do milímetro de água aplicada e do preço da megagrama de cana, a qual depende do preço dos açúcares totais recuperáveis (ATR). Apesar de o ATR (kg Mg⁻¹) ter apresentado graficamente certo grau de variação em função das lâminas de irrigação, esta variação não foi significativa e pode ser

desconsiderada de vez que, devido ao estresse hídrico provocado para a maturação da cana, os tratamentos ficaram praticamente na mesma condição; assim, no 1º ano a produtividade de máxima eficiência econômica, com o preço do ATR de 0,30 R\$ kg⁻¹, foi 154,6 Mg ha⁻¹ obtida com 316 mm brutos de irrigação. Para o preço médio do ATR de 0,55 R\$ kg⁻¹, a produtividade de máxima eficiência econômica foi 178,8 Mg ha⁻¹ obtida com 666 mm. Com o ATR de 0,80 R\$ kg⁻¹, a lâmina máxima econômica foi 798 mm e gerou TCH de 184,2 Mg ha⁻¹.

No segundo ciclo de cultivo, com o ATR igual a 0,30 R\$ kg⁻¹, a irrigação não seria viável e assim o TCH máximo econômico foi de 112,2 Mg ha⁻¹ obtido com 0 mm de irrigação. Com remuneração de ATR igual a 0,55 R\$ kg⁻¹, a lâmina máxima econômica foi de 290 mm, resultando em TCH de 129,9 Mg ha⁻¹. Com o preço do ATR de 0,80 R\$ kg⁻¹, o TCH máximo econômico foi de 136,7 Mg ha⁻¹ obtido com 457 mm.

No terceiro ano, para os preços do ATR de 0,30; 0,55 e 0,80 R\$ kg⁻¹, o TCH econômico foi igual a 81,5, 104,8 e 118,2 Mg ha⁻¹, obtidas com 0, 397 e 718 mm, respectivamente.

Observa-se que, ao longo dos ciclos de cultivo, houve redução nos valores de produtividade agrícola devido ao envelhecimento das socarias, ataque de pragas e doenças etc.; porém, em cada ciclo de produção avaliado houve maior proximidade entre as lâminas econômicas geradas com as duas maiores remunerações do ATR devido à resposta da cultura ser não linear em que, quanto maior o preço do kg de ATR mais água é possível ser aplicada; no entanto, a partir de certo ponto há redução na taxa de biomassa produzida por milímetro de água acrescentado.

Este efeito também pode ser verificado na Margem de Contribuição Agrícola (MCA) apresentada nas Figuras 9D, 9E e 9F. A MCA máxima do 1º ciclo gerada com os preços do ATR iguais a 0,30; 0,55 e 0,80 R\$ kg⁻¹ foi de 453,20; 3.272,07 e 6.285,62 U\$ ha⁻¹, respectivamente; no 2º ano os valores máximos da MCA foram de 433,87; 2.456,90 e 4.705,50 U\$ ha⁻¹ para o ATR de 0,30; 0,55 e 0,80 R\$ kg⁻¹, respectivamente; no 3º ano de cultivo a MCA apresentou valores máximos de 3,05; 1.474,51 e 3.321,83 U\$ ha⁻¹ para os respectivos valores de ATR iguais a 0,30; 0,55 e 0,80 R\$ kg⁻¹.

A MCA da cana-planta com o ATR de 0,55 R\$ kg⁻¹ foi 33 e 122% maior que a das 1ª e 2ª socas, respectivamente. Para o ATR de 0,80 R\$ kg⁻¹ a MCA do 1º ciclo foi 34 e 89% maior que a do 2ª e 3ª ciclo de produção, respectivamente. Como a cana-planta geralmente possui maior vigor vegetativo, a mesma pode produzir biomassa e gerar receitas suficientes para saldar o custo de implantação do canavial, caso o ATR tenha um preço mínimo de 0,45 R\$ kg⁻¹; no entanto, se o preço do ATR estiver muito baixo ou se a cana-semente for de baixa qualidade, o produtor pode estender o período de *payback* para determinado número de safras em função de uma série de fatores, como a vida útil do canavial (tempo de renovação) e a expectativa de produtividade em cada ciclo. Além do mais, o produtor deve estar atento ao fato de que, como a MCA depende do

custo operacional de produção da cana e neste está diluído o custo de corte, carregamento e transporte (CCT), quanto maior a biomassa de colmos produzidos maior também será o custo do CCT; porém, neste trabalho foi utilizado o custo médio de CCT entre os tratamentos, pois o objetivo foi analisar apenas a variação do custo com a água de irrigação. Desta forma, a análise da interação entre os dois custos poderá ser realizada em outros trabalhos a serem desenvolvidos.

Vieira et al. (2012) encontraram, ao trabalharem com a variedade RB867515 irrigada por pivô central e lâminas totais entre 1.242 e 2.086 mm, produtividade máxima de 125,9 Mg ha⁻¹ com lâmina total (chuva + irrigação) de 1.854,4 mm. A lâmina de maior eficiência econômica foi de 1.726,2 mm para uma produtividade de 123,9 Mg ha⁻¹. A maior quantidade de açúcares (ATR) por megagrama de colmos foi de 141,3 kg Mg⁻¹ com lâmina total de 1.617,7 mm; a partir deste valor o ATR foi reduzido em razão da maior quantidade de água disponível para a cultura no estágio de maturação, com o que a compensação de alto TCH com baixo ATR resultou em produtividade máxima de açúcar (TAH) de 17,25 Mg ha⁻¹ com lâmina total de 1.740,5 mm.

Farias et al. (2009) observaram, ao estudarem a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar na região de Capim-PB, que a maximização do uso eficiente da água para a variedade SP 79-1011 foi obtida com lâmina total de 1.276,29 mm.

O cálculo dos custos de insumos na agricultura para se ter o máximo retorno de capital envolve diversos fatores que nem sempre podem ser controlados, principalmente quando se trata de fatores ambientais. Portanto, trabalhos como este servem para ser tomados como base em decisões administrativas, desde que as condições sejam semelhantes às do local onde foi realizada a pesquisa. Além disto, questões econômicas, como preços de insumos e *commodities* agrícolas, estão sujeitas a alterações diariamente, ficando a critério de o administrador buscar a melhor solução e escolher a alternativa mais compensatória para o uso de determinado insumo.

6. CONCLUSÕES

Para regiões com características edafoclimáticas semelhantes às da região desta pesquisa, conclui-se que:

1. A evapotranspiração real da cana-de-açúcar varia conforme o regime hídrico ao qual a cultura agrícola é submetida. Como no cálculo do K_c duplo para sistemas de gotejamento a evaporação é insignificante, a evapotranspiração real se torna menor que a evapotranspiração da cultura em dias sem ocorrência de chuvas;

2. Com base no Índice de Satisfação das Necessidades de Água da cultura, o cultivo da cana-de-açúcar em regime de sequeiro na região de Rio Largo, Alagoas, está exposto a médio risco climático;

3. A resposta da cana-de-açúcar a níveis de irrigação é estatisticamente significativa nos primeiro, segundo e terceiro ciclos de cultivo;

4. A produtividade física máxima em cana-planta, primeira soca e segunda soca, é obtida com a lâmina de irrigação equivalente a 138, 184 e 252% da ET_0 , respectivamente.

5. A cana-de-açúcar irrigada com K_c máximo de 1,5 (150% da ET_0), nos primeiro, segundo e terceiros ciclos de cultivo, produz em média 48,0 Mg ha⁻¹ a mais do que a cana cultivada sem irrigação;

6. A quantidade de ATR por tonelada de cana em função de lâminas de irrigação segue um modelo quadrático, mas praticamente não influencia o rendimento agroindustrial final por unidade de área cultivada, sendo este dependente apenas da produtividade de colmos;

7. A lâmina econômica de irrigação no intervalo de 0 a 150% da ET_0 do período seco é diretamente proporcional ao aumento do preço do ATR; e para o valor médio de 0,55 R\$ kg⁻¹ de ATR, a lâmina de máxima eficiência econômica é de 666 (85% da ET_0), 290 (65% da ET_0) e 397 mm (70% da ET_0), gerando margem de contribuição agrícola de 3.272,07; 2.456,90 e 1.474,51 U\$ ha⁻¹ em cana-planta, 1^a e 2^a socas, respectivamente. A lâmina econômica média é de 451 mm (73% da ET_0) e gera renda líquida de U\$ 2.401,16.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. L.; SILVA, M. A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L. A.; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v.72, n.3, p.262-270, 2013.

ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; LIMA, V. L. A.; MENEZES, D.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS NETO, J.; SILVA JÚNIOR, J. G. Características vegetativas do coentro submetido a doses do polímero hidroabsorvente e lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.671- 679, 2009.

ALENCAR, C. A. B.; OLIVEIRA, R. A.; CÓSER, A. C.; MARTINS, C. E.; CUNHA, F. F.; FIGUEIREDO, J. L. A. Produção de capins cultivados sob pastejo em diferentes lâminas de irrigação e estações anuais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.680-686, 2009.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Newark, v.131, n.1, p.1-13, 2005.

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

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

BARBOSA, F. S.; COELHO, R. D.; MASCHIO, R.; LIMA, C. J. G. S.; SILVA, E. M. Drought resistance of sugar-cane crop for different levels of water availability in the soil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.2, p.203-210, 2014.

BOAS, R. C. V.; Pereira, G. M.; Reis, R. P.; Lima Junior, J. A.; Consoni, R. Viabilidade econômica do uso do sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cebola. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.4, p.781-788, 2011.

BUSO, P. H. M.; KOEHLER, H. S.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; IDO, O. T.; BESPALHOK FILHO, J. .; WEBER, H.; OLIVEIRA, R. A.; ZENI NETO, H. O sistema radicular da variedade RB855536 de cana-de-açúcar no plantio em minitolete e tolete. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.5, p.343-349, 2009.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; PORFIRIO, A. C. S. Ocorrência de períodos secos na região de Rio Largo, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.28, n.2, p.173-180, 2013a.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; SILVA, E. C. Estação chuvosa e de cultivo para a região de Rio Largo, Alagoas baseada em métodos diretos e sua relação com o El Niño – Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v.28, n.2, p.192-198, 2013b.

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

CARVALHO, O. M: **Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo, cultivados com cana-de-açúcar**. 2003. 74p. (Dissertação mestrado em agronomia) – Rio Largo: Universidade Federal de Alagoas, 2003.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar 2013/14, Quarto levantamento**. Brasília: CONAB, abril, 2014. 14p.

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

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

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. K. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306p.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO 1979. 193p. (Estudios FAO: Yield response to water, paper 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977.144p. Irrigation and Drainage Paper, 24.

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

FARIAS, C. H. 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. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.494-506, 2008.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB, 2003. 240p.

FRIZZONE, J. A. **Função de Produção**. In: FARIA, M. A.; SILVA, E. L.; VILELLA, L. A. A.; SILVA, A. M. (Ed.) Manejo de Irrigação, Lavras: UFLA/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, p. 87-116, 1998.

JORNAL CANA. Disponível em <<http://www.jornalcana.com.br>> Acesso em 20 e outubro de 2013.

KEATING, B. A. ROBERTSON, M. J. MUCHOW, R. C. HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.48, p.27-36, 1999.

LIMA JÚNIOR, J. A.; PEREIRA, G. M.; GEISENHOF, L. O.; COSTA, G. G.; VILAS BOAS, R. C.; YURI, J. E. Efeito da irrigação sobre o rendimento produtivo da alface americana, em cultivo protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.797-803, 2010.

LYRA, G. B.; PONCIANO, N. J.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DAHER, R. F.; PEREIRA, M. G.; MARINHO, A. B. Estimativa dos níveis ótimos e econômicos de irrigação no mamoeiro (*Carica papaya* L.) cultivar Golden nas condições do norte do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal**, v.30, n.2, p.390-395, 2008a.

LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; SOUZA, E. F. Evapotranspiração da Cultura de Cana de Açúcar na Região de Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas: Coeficiente da Cultura “Único” Padrão Boletim FAO-56 Kc_unico2007. **STAB**, Piracicaba, v.25, n.54, p.40-43, 2007b.

LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; LYRA, G. B.; SEDIYAMA, G. C.; MAIA, S. M. F. Evapotranspiração da cultura de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas: coeficiente da cultura “dual” padrão boletim FAO-56. **STAB**, Piracicaba, v.25, n.5, p. 44-51, 2007c.

MARTINS, C. A. S.; REIS, E. F.; NOGUEIRA, N. O. Análise do desempenho da irrigação por microspray na cultura do café conilon. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.7, n.12; p.01-13, 2011.

MOREAU, A. M. S. S.; COSTA, L. M.; KER, J. C.; GOMES, F. H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.6, p.1021-1030, 2006.

OLIVEIRA, E. C.; CARVALHO, J. A.; SILVA, W. G.; REZENDE, F. C.; GOMES, L. A. A.; JESUS, M. C. N. Análise produtiva e econômica do pepino japonês submetido a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.7, p.702–708, 2011.

OLIVEIRA, E. L.; ANDRADE, L. A. B.; FARIA, M. A.; EVANGELISTA, A. W. P.; MORAIS, A. R. Uso da vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.1398-1403, 2009.

OLIVEIRA, S. D.; SILVA, V. P. R.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, M. T.; SOUSA, E. P. Os Impactos das Alterações Climáticas na Cana-de-açúcar Cultivada em Sistema de Sequeiro na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.1, p.170-184, 2012.

OMETO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1982. 425 p.

PARKES, M. et al. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, Cordoba, v.29, p.331-339, 2010.

RODRIGUES, R. C.; SOUZA, J. M.; MARQUES, H. I. P.; BONOMO, R.; SCHMILDT, E. R. Produtividade e variáveis agroindustriais de cinco variedades de cana-de-açúcar no Norte do Espírito Santo. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.8, n.15, p.1443-1451, 2012.

ROERINK, G. J.; BASTIAANSEN, W. G. M.; CHAMBOULEYRON, J.; MENENTI, M. Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing. **Water Resources Management**, Athens, v.11, p.445-465, 1997.

SANTANA, M. J.; CARVALHO, J. A.; ANDRADE, M. J. B.; GERVÁSIO, G. G.; BRAGA, J. C.; LEPRI, E. B. Viabilidade técnica e econômica da aplicação de água na cultura do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.532-538, 2009.

SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.3, p.241-249, 2014.

SILVA, P. A. M.; PEREIRA, G. M.; REIS, R. P.; LIMA, L. A.; TAVEIRA, J. H. S. Função de resposta da alface americana aos níveis de água e adubação nitrogenada. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.1266-1271, 2008.

SILVA, V. P. R.; OLIVEIRA, S. D.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, M. T. Risco climático da cana-de-açúcar cultivada na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.2, p.180-189, 2013.

SILVA, S.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; DANTAS NETO, J. Adaptação do método de Kc “dual” (FAO-56) para a cana-de-açúcar irrigada por gotejamento. **ABEAS**, Brasília, v.27, n.2, p.87-93, 2012a.

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

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

SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato do Açúcar e do Álcool do Estado de Alagoas) disponível em: <<http://www.sindaçucar.al.com.br/prodagricmédia.htm>. > acesso em 13 de outubro de 2013.

SOUZA, J. L.; MOURA FILHO, G.; LYRA, R. F. F.; TEODORO, I.; SANTOS, E. A.; SILVA, J. L.; SILVA, P. R. T.; CARDIM, A. H.; AMORIM, E. C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do Tabuleiro Costeiro de Maceió, AL, período 1972-2001. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.12, n.1, p.131-141, 2004.

TEODORO, I.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; BRITO, K. S.; SÁ, L. A.; SANTOS, M. A. L.; SARMENTO, P. L. V. S. Isoquantas de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. **Irriga**, Botucatu, v.18, n.3, p.387-401, 2013.

TEODORO, I.; SOUZA, J. L.; BARBOSA, G. V.; MOURA FILHO, G.; DANTAS NETO, J.; ABREU, M. L. Crescimento e Produtividade da Cana-de-açúcar em Cultivo de Sequeiro nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **STAB**, Piracicaba, v.27, n.4, p.31-34, 2009.

THOMPSON, G. D.; BOYCE, J. P. Daily measurements of potential evapotranspiration from fully canopied sugarcane. **Agricultural Meteorology**, New Haven, v.4, p.267-279, 1967.

TOPPA, E. V. B.; JADOSKI, C. J.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.3, n.3, p.215-221, 2010.

TOSELLO, R. N.; REIS, A. J.; BARRETO, G. B. Balanço de água no solo em cultura de cana-de-açúcar. Resultados da estação experimental de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Campinas, v.25, n.31, p.337-347, 1966.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, E. L.; DELAZARI, F. T. Produtividade de colmos e rendimento de açúcares da cana-de-açúcar em função de lâminas de água. **Irriga**, Botucatu, v.17, n.2, p.234-244, 2012.

VON LIEBIG, J. **Die chemie in ihrer Anwendung auf Agrikultur und Physiologie**. Veinegn: Braunschweig, 1840, 342p.