

LAÍS BARRETO FRANCO

**MANEJO DE IRRIGAÇÃO VIA SENSORES DE SOLO E
FONTES NITROGENADAS NO CRESCIMENTO DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

**RECIFE - PE
2020**

LAÍS BARRETO FRANCO

**MANEJO DE IRRIGAÇÃO VIA SENSORES DE SOLO E
FONTES NITROGENADAS NO CRESCIMENTO DA CANA-DE-
AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como parte dos
requisitos do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes
Cabral de Almeida

RECIFE - PE
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F895m Franco, Laís Barreto
Manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas no crescimento da cana-de-açúcar /
Laís Barreto Franco. - 2020.
95 f. : il.

Orientadora: Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola, Recife, 2020.

1. Sensor de umidade do solo. 2. FDR. 3. Nitrogênio. 4. Lâmina de água. 5. Muda pré-brotada (MPB).
I. Almeida, Ceres Duarte Guedes Cabral de, orient. II. Título

CDD 630

LAÍS BARRETO FRANCO

MANEJO DE IRRIGAÇÃO VIA SENSORES DE SOLO E FONTES NITROGENADAS
NO CRESCIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.

Dissertação defendida e aprovada em 28 de abril de 2020 pela banca examinadora:

Orientadora:

Prof.ª. Dr.ª. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida

CODAI - UFRPE

Examinadores:

Prof. Dr. Gerônimo Ferreira da Silva

DEAGRI - UFRPE

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto

EECAC – UFRPE

Dr. Eduardo César Medeiros Saldanha

Yara Fertilizantes - Brasil

DEDICO

Aos meus pais (Gilmar e Fátima) e ao meu irmão Gustavo por todo amor, compreensão e por nunca terem me desamparado. Como também a minha orientadora Ceres que contribuiu imensamente na construção e finalização deste trabalho. Muito obrigada!

AGRADECIMENTOS

Mais uma etapa em minha vida concluída, e com ela grandes aprendizados de vida e acadêmico foram adquiridos. Neste momento, mais do que nunca, quero agradecer a todos aqueles que estiveram presentes nessa jornada percorrida por mim. Sem o apoio de muitos jamais chegaria até o fim, principalmente do meu pai maior: Deus. Portanto, quero começar agradecendo a Deus por estar sempre comigo, me guiando, iluminando e abençoando cada passo que tenho dado. Obrigada por me dá a fé e a força necessária para lutar e enfrentar todos os obstáculos sem nunca desistir. Sem essa força divina, nenhuma conquista seria possível.

Como também seria improvável chegar até este momento sem ter o apoio da minha família, ao meu pai Gilmar, minha mãe Fátima e meu lindo irmão Gustavo. Mãe, lembra que eu disse que iria fazer o MESTRADO, mas na hora e no momento certo? Sei que quando disse isso a senhora estava um pouco desapontada pela minha decisão em ter ido para o mercado de trabalho e tinha suas dúvidas se eu teria esse título, pois bem, aí chegou o dia. Eu consegui mãe, e essa vitória é nossa!

Minha mãe foi e é presente na minha vida, me apoia nas minhas decisões (até mesmo querendo dizer: não faça), me protege e cuida como uma leoa. Uma mulher que me orgulho e me espelho por ser uma mãe exemplar e guerreira, pois alcançou seus objetivos profissionais mesmo nas dificuldades da vida. Meu pai, exemplo de homem que não tem como colocar defeito, é querido por todos e eu sou louca por ele, tenho muito orgulho de ser sua filha Pai. Um homem honesto e humilde que não tem igual, sem maldade no coração. Meu irmão, sempre presente em minha vida e me apoiando em todas as situações. Muito orgulho em ser sua irmã, pois você é uma pessoa fantástica, humilde, inteligente e de uma paciência sem tamanho (quando quer). Eu não poderia ter um irmão melhor que você. Você é tudo para mim! Agradeço todos os dias por ter vocês em minha vida. Amo demais vocês!

A minha orientadora Ceres, na verdade ela foi mais que uma orientadora pois, em alguns momentos foi mãe, sempre disposta e atenciosa em me escutar e aconselhar em momentos chaves da minha vida. Construímos a nossa história baseada em confiança, lealdade, vitórias (muitas), alegrias, publicações (muitas), risadas e/ou mesmo gargalhadas. Mas foram só flores? Sabemos que não, porém os momentos que não foram tão bons ou até um pouco desesperadores com o nosso experimento, conseguimos vencer, e sempre com um sorriso no rosto (nem que seja mandando uma figurinha no Whatsapp para amenizar a

situação, e a senhora passar “vergonha” dando crises de risos). Sou muito feliz e grata por tê-la como orientadora, e hoje posso dizer: é minha amiga, pois sei que onde eu estiver posso contar com a senhora, e se Deus permitir iremos manter os nossos laços de amizade para sempre.

Ao Saldanha, meu querido mestre, que esteve ali presente na decisão entre a “cruz e a espada” juntamente com meu (ex) chefinho Lenildo (gosto de graça, e por sinal estava comigo quando recebi a notícia da aprovação do mestrado, e até hoje muito presente no meu dia a dia com sua preocupação de “pai”). Saio ou não saio da Yara? “Eita” que essa decisão não foi fácil. Ao mesmo tempo que eu precisava e sentia a necessidade em fazer o mestrado, eu tinha criado uma história na empresa (grata ao Bruno Braga por ter lutado pela minha permanência na empresa, mesmo sabendo que eu tinha optado pelo desligamento). Então, a decisão foi tomada e aqui estou: mestre. Saldanha, muito obrigada por todo apoio em todas as etapas dessa trajetória, as suas contribuições, desde a elaboração até a conclusão desse trabalho, foram fundamentais.

Ao meu tio Gildo que mesmo com o jeito rústico dele, mas estava presente nas dificuldades. As minhas avós: Claudete e Letinha, cada uma do seu jeito mas, sempre mostrando carinho e amor por mim, sempre se preocupando comigo; e sei que estou em suas orações. Agradeço também a minha madrinha tia Lú pelo carinho e presença. Não poderia faltar à lembrança do meu querido Tio Cleres, que permanece em minha memória, nunca esqueço o que você dizia para meu pai: “seus meninos vão longe, eu confio neles”, lembranças como essas que guardo comigo e as recordo sempre nas horas mais difíceis, pois são essas palavras que jamais me deixaram desistir de nada.

Aos meus amigos “ruralenses” que me suportaram no dia a dia e que a amizade vai mais além do que a UFRPE, são eles: Martiliana (Boneca Viva), Martha (a menina dos rolês errados), Tecla (fofinha), Alan (“Deixa eu Viver”), Victor (meu lindo), Jéssica (amada), Uriel (ô nego), Andrey, Salimo, Marcela e Breno. Essas pessoas que passei mais da metade do curso perturbando o juízo, seja com as minhas brincadeiras ou até mesmo pedindo uma mãozinha na casa de vegetação. Por falar em casa de vegetação, aproveito para citar outras pessoas que foram essenciais na implantação do experimento: os alunos do CODAI (Ismael, Jair, Natália, Rayza e Júnior), aos bolsistas PIBIC maravilhosos que tive a oportunidade em trabalhar como a Girlayne (ela têm um coração enorme e muito determinada), Alyne (pessoa de extrema capacidade de aprendizagem e proatividade sem igual) e o Pedro (menino doce e trabalhador), como também os alunos da agronomia: Eduardo, Marcelo, Leonardo e

Monaliza que me deram apoio nas atividades. Sem vocês seria muito difícil chegar até aqui. Vocês são demais!

Em especial, agradeço a minha irmãzinha, Martiliana, pela parceria e ter me suportando o tempo todo. Apesar de muitos acharem que a gente só brigava, na verdade vivíamos em harmonia até porque quando ela estava atacada eu corria para meu quarto. Mas no normal eram dias de risadas ou mesmo gargalhadas, ainda mais, quando eu achava de cantar e dançar, foram vários momentos maravilhosos. Sem contar também as tretas que nos metíamos, melhor nem citar. As resenhas pelo celular (mesmo estando no mesmo lugar), e principalmente o apoio em tudo que eu precisei. Se resume em uma amizade verdadeira e uma pessoa muito especial pra mim! “Oh pessoa que me ama”! Voa boneca viva!

Aos meus amigos que torcem e oram por mim Riccana (amizade inexplicável), Adriana (minha tia), Ayala (minha prima/amiga), Bruna (meu ombro amigo), Lucas (meu neném), Tayla, Mateus, Gaby, Thiago, Margarete, Giselle, Marcão, Jully, Jeh, Jucimar, Dimaleia, George Nathan, Zé e família (cuidam dos meus bichinhos como se fossem deles).

Agradeço a todos os professores que contribuíram para a minha formação de mestre ao longo desses dois anos, principalmente aos professores: Brivaldo, Audifax, Veronildo, Laércia, Gerônimo, Amilton e Manassés. Como também a Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), pela disponibilização das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (MPB), em especial ao Djalma pelas contribuições na concepção do projeto e Evanílson que sempre se mostrou disponibilidade em atender as nossas demandas quanto à disponibilização das MPB, dentro dos requisitos necessários para o experimento (época de produção, variedade, número e qualidade das mudas). Bem como, o Eudes pelo suporte e toda sua paciência em me auxiliar nas atividades dentro do Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Agronomia da UFRPE.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado. Como também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

<i>Lista de Figuras</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>x</i>
RESUMO GERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. HIPÓTESES	18
3. OBJETIVO GERAL	19
3.1. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO I	20
REVISÃO DE LITERATURA	20
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1. Água na produção agrícola	21
4.2. Automação na agricultura irrigada	22
4.3. Determinação da umidade no solo	23
4.4. Sensores de capacitância	25
4.4.1. Calibração de sensores	26
4.5. Cana-de-açúcar	27
4.5.1. Plantio de mudas pré-brotadas (MPB)	29
4.5.2. Necessidade hídrica da cultura	30
4.5.3. Adubação nitrogenada	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
CAPÍTULO II	43
DESEMPENHO DE SONDAS DE CAPACITÂNCIA NA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA EM SOLOS AGRÍCOLAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO	43
RESUMO	44
ABSTRACT	45
INTRODUÇÃO	46
MATERIAL E MÉTODOS	47
RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

<i>CAPÍTULO III</i>	<i>67</i>
<i>DESENVOLVIMENTO INICIAL DE MPB DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE SOLO E FONTES NITROGENADAS</i>	<i>67</i>
<i>RESUMO:</i>	<i>68</i>
<i>ABSTRACT:</i>	<i>69</i>
<i>MATERIAL E MÉTODOS</i>	<i>73</i>
<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	<i>78</i>
<i>CONCLUSÕES.....</i>	<i>87</i>
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	<i>88</i>

Lista de Figuras

Figura 1. Posicionamento dos sensores ECH2O, modelos 5TE e EC-5, e do tubo de acesso da Diviner 2000 para monitoramento da umidade do solo nos vasos.	49
Figura 2. Curvas de secagem dos solos estudados em função dos valores de umidade estimada pelos sensores EC-5, 5TE e Diviner e a umidade gravimétrica (pesagem) convertida em umidade volumétrica; (A) Solo de textura franco argilo arenosa; (B) Solo de textura areia.	53
Figura 3. Curvas de secagem do solo, corrigidas com as respectivas equações específicas de calibração de cada sensor; (A) Solo franco argilo arenosa; (B) Solo areia.	56
Figura 4. Umidade volumétrica estimada pelos sensores EC-5 (A), 5TE (B) e Diviner (C) antes e depois da calibração e sua correlação com a umidade volumétrica medida para o solo de textura franco argilo arenosa.	57
Figura 5. Umidade volumétrica estimada pelos sensores EC-5 (A), 5TE (B) e Diviner (C) antes e depois da calibração e sua correlação com a umidade volumétrica medida para solo de classe textural areia.	58
Figura 6. Temperatura média diária do ar (°C), umidade relativa média do ar (%) e EToPiché (mm d ⁻¹) dentro do ambiente protegido, durante o período experimental.	73
Figura 7. Diâmetro de colmo e número de internódios da cana-de-açúcar em função do manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.	82
Figura 8. Eficiência do uso da água para as variáveis de massa fresca (EUAf) e massa seca (EUAs) para cana-de-açúcar submetidas ao manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.	85

Lista de Tabelas

Tabela 1. Atributos físicos e químicos para caracterização dos solos estudados.	48
Tabela 2. Classificação de desempenho conforme o valor do coeficiente “c”.....	52
Tabela 3. Equações de calibração obtidas nos solos estudados.....	55
Tabela 4. Índices estatísticos para os sensores EC-5, 5TE e Diviner antes e depois da calibração.	59
Tabela 5. Características físico-hídricas e químicas do solo utilizado neste estudo.	74
Tabela 6. Equações de calibração obtidas para o solo estudado.	76
Tabela 7. Variáveis biométricas analisadas e volume de água gasto para o cultivo da cana-de-açúcar RB92579 em função do manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.	79
Tabela 8. Massa fresca de parte aérea (MFPA), Massa seca de parte aérea (MSPA) e Total de água aplicada (TA), da cana-de-açúcar submetida ao manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.	84

FRANCO, LAÍS BARRETO. MSc. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Abril de 2020. **Manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas no crescimento da cana-de-açúcar.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida

RESUMO GERAL

O manejo da irrigação, por meio da utilização de sensores eletrônicos que estimam em tempo real o conteúdo de água no solo, e de N-fertilizante têm demonstrado efeito sinérgico positivo no desenvolvimento vegetal e potencial produtivo da cana-de-açúcar. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho de diferentes sensores eletrônicos de umidade do solo na otimização do manejo da irrigação, visando elevar a precisão no uso racional da água, como também comparar o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar sob diferentes fontes de nitrogênio. O experimento foi conduzido em ambiente protegido do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, campus Recife-PE, entre os meses de abril a maio de 2019, inicialmente para calibração dos sensores; e, de dezembro de 2019 e março de 2020, para avaliação do desempenho destes no desenvolvimento inicial da cultura estudada sob diferentes fontes de nitrogênio. Para calibração, os sensores EC-5, 5TE e Diviner foram posicionados verticalmente nos vasos, com quatro repetições para cada tipo de solo (texturas franco argilo arenosa e areia). Após atingir a saturação por capilaridade, os vasos foram colocados em uma bancada, a fim de permitir a drenagem do excesso de água. Em seguida, os vasos foram pesados e realizadas as respectivas leituras de umidade do solo, representando a umidade equivalente à capacidade de campo. Diariamente, e em horário fixo (8 h), foram realizadas as pesagens e a leitura de cada sensor eletrônico. Os resultados foram submetidos à análise de regressão e, os índices estatísticos de Willmott, RMSE, coeficiente de determinação e erro médio foram utilizados para avaliar a qualidade do ajuste entre os valores medidos (umidade gravimétrica) e estimados pelos sensores de umidade de solo. Os sensores apresentaram equações de calibração de modelo linear para ambos os solos, e as análises apontaram boa correlação entre as leituras de umidade volumétrica medida e a estimada para ambos os solos com R^2 acima de 0,94. A equação de calibração dos fabricantes de todos os sensores, EC-5, 5TE e Diviner superestimaram 2,77; 9,88 e 7,51%, respectivamente, os valores reais de umidade para o solo de textura mais arenosa e subestimaram em 21,88, 15,63 e 7,64%, de modo

respectivo, no solo franco argilo arenosa, resultando em erros da determinação da lâmina de irrigação e, conseqüentemente, na quantidade de água demandada pela cultura. Sendo assim, e considerando a importância da mensuração da umidade do solo para o manejo da agricultura irrigada, os resultados desta pesquisa reforçam a necessidade de calibrar os sensores capacitivos ECH2O e Diviner em solos franco argilo arenosa e areia para fins de irrigação, visando o uso racional dos recursos naturais. De posse das equações de calibração, o segundo experimento foi conduzido para avaliar o desempenho dos sensores de umidades do solo (EC-5, 5TE e Diviner 2000) e da aplicação de duas fontes de nitrogênio ((NH₄)₂SO₄ e NH₄NO₃) nas variáveis biométricas da cana-de-açúcar. Para tanto, os tratamentos foram arranjos em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 2, com 4 repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. A irrigação foi realizada automaticamente, mediante um controlador eletrônico, de modo a aplicar as lâminas de irrigação de acordo com os tratamentos estabelecidos. As variáveis biométricas foram avaliadas mensalmente e ao final do experimento. Os resultados das variáveis biométricas foram submetidos à análise de variância, em nível de 0,05 de probabilidade. Como resultado para o solo franco argilo arenosa, os tratamentos nitrato de amônio utilizando o sensor 5TE e sulfato de amônio com EC-5 apresentaram maior eficiência do uso da água para as variáveis de massa seca 0,17 e 0,19 kg m⁻³, respectivamente, e massa fresca com 0,49 kg m⁻³ para ambos os tratamentos.

Palavras-chave: Sensor de umidade do solo; FDR; Nitrogênio; Lâmina de água; Mudanças pré-brotadas (MPB).

FRANCO, LAÍS BARRETO. MSc. Federal Rural University of Pernambuco. April of 2020.
Irrigation management via soil sensors and nitrogen sources in sugarcane growth.

Advisor: Prof^a. Dr^a. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida

GENERAL ABSTRACT

The management of irrigation, through the use of electronic sensors that estimate in real time the soil water content, and of N-fertilizer have demonstrated a positive synergistic effect on plant development and productive potential of different varieties of sugarcane. Thus, the objective of this research was to evaluate the performance of different electronic sensors of soil moisture in the optimization of irrigation management, aiming to increase the precision in the rational use of water, as well as to compare the initial development of sugarcane under different sources of nitrogen. The experiment was carried out in a protected environment at the Agricultural Engineering Department of the Federal Rural University of Pernambuco, campus Recife-PE, between April and May 2019, initially for the calibration of sensors; and, from December 2019 and March 2020, to assess their performance in the initial development of the sugarcane under different sources of nitrogen. For calibration, the EC-5, 5TE and Diviner sensors were positioned vertically in the pots, with four replicates for each type of soil (sandy clay loam and sandy textural classes). After reaching capillarity saturation, the pots were placed on a bench in order to allow the drainage of excess water. Then, the pots were weighed and the respective soil moisture readings were performed, representing the moisture equivalent to the field capacity. Weighing and reading each electronic sensor was performed daily and at a fixed time (8 am). The results were subjected to regression analysis and the statistical indexes Willmott, RMSE, determination coefficient and mean error were used to assess the quality of the fit between the measured values (gravimetric moisture) and estimated by soil moisture sensors. The sensors presented linear model calibration equations for both soils, and the analyzes showed a good correlation between the readings measured volumetric moisture and the estimated for both soils with R^2 above 0.94. The manufacturers calibration equation of all sensors, EC-5, 5TE and Diviner overestimated 2.8; 13.86 and 7.51%, respectively, the real moisture values for the sandy soil and underestimated by 21.88, 15.63 and 7.64%, respectively, in the sandy clay loam soil, resulting in errors in determining the irrigation depth and, consequently, in the amount of water required by the crop. Thus, and considering the importance of measuring soil moisture for the management of irrigated

agriculture, the results of this research reinforce the need to calibrate the capacitive sensors ECH2O and Diviner in sandy clay loam and sandy soils for irrigation purposes, aiming at the use rational use of natural resources. After this step, the second experiment was carried out to evaluate the performance of soil moisture sensors (EC-5, 5TE and Diviner 2000) and the effects of application of two sources of nitrogen ((NH₄)₂SO₄ and NH₄NO₃), in the biometric variables. Therefore, the treatments were arranged in a completely randomized design, in a 3 x 2 factorial scheme, with 4 replications, totaling 24 experimental plots. The irrigation was carried out automatically, using an electronic controller, in order to apply the irrigation depths according to the established treatments. Biometric variables were assessed monthly and at the end of the experiment. The results of the biometric variables were subjected to analysis of variance, at the level of 0.05 probability. As a result for the sandy clay loam soil, the ammonium nitrate treatments using the 5TE sensor and ammonium sulfate with EC-5 showed greater water use efficiency for dry mass 0.17 and 0.19 kg m⁻³, respectively, and fresh mass with 0.49 kg m⁻³ and for both treatments.

Keywords: Soil moisture sensor; FDR; Nitrogen; Irrigation depth; Pre-sprouted seedlings.

1.INTRODUÇÃO GERAL

O uso da irrigação contribui decisivamente na melhoria do rendimento das culturas, uma vez que a água é um fator limitante à produção vegetal (ROMÁN et al., 2015). Esta tecnologia, desde que adequadamente desenvolvida, oferece soluções capazes de promover transformação social e econômica no meio rural, gerando novos empregos e elevando a renda do agricultor. No Brasil, a área irrigada tem crescido consideravelmente nas últimas décadas, média anual superior a 4% desde o ano de 1960 a 2015. A região nordeste aumentou a área irrigada em cerca de 2,5% por ano no mesmo período (ANA, 2017a).

A viabilidade da agricultura irrigada exige técnicas cada vez mais eficientes e adequadas diante do cenário de escassez de recursos naturais, como também a importância na conservação do ambiente (BRITO, 2008). O manejo de irrigação consiste em manter a disponibilidade adequada de água no solo para o pleno desenvolvimento das culturas (ALEMAN e MARQUES, 2016). As informações sobre o sistema de integração solo – água – planta – atmosfera fomenta metodologias e critérios para otimização do uso da água e nutrientes no manejo de irrigação. O suprimento hídrico na quantidade exata e no momento certo são fatores determinantes para o aumento da produtividade, como o uso racional da água, energia e insumos agrícolas para uma agricultura sustentável (BENETT et al., 2013).

Os métodos de manejo utilizados na agricultura irrigada precisam de aprimoramentos (COOLEY et al., 2009), ainda mais em razão do cenário de mudanças climáticas. Desta forma, o uso eficiente da água de irrigação exige conhecimento das diversas propriedades físico-hídricas do solo e da determinação exata da necessidade hídrica da cultura, essencial para o sucesso da irrigação. O manejo preciso da irrigação é necessário para otimizar a produção comercial em termos de qualidade e produtividade, especialmente em regiões onde o recurso hídrico é limitado (VARBLE e CHÁVEZ, 2011).

Os sensores eletrônicos estão sendo utilizados na agricultura como ferramenta de monitoramento do conteúdo de água no solo. Diversos são os métodos indiretos utilizados para esse fim, tais como tensiômetros, termalização de nêutrons, resistência elétrica (capacitância) e reflectometria no domínio do tempo (EVETT et al., 2002; HENG et al., 2002; STARR et al., 2009; VARBLE e CHÁVEZ, 2011).

As sondas de capacitância são de baixo custo e de fácil adaptação a sistemas automáticos de obtenção de dados. Estas sondas aparecem como alternativa bastante promissora para manejo da irrigação, seja em ambiente protegido ou não. Assim, o uso deste

equipamento juntamente com um datalogger ou com um sistema de rede sem fio aumenta a precisão no manejo de irrigação (WIEDENFELD, 2004; DURSUN e OZDEN, 2011); ou seja o uso destes equipamentos pelo agricultor visa auxiliar na tomada de decisão de quando e quanto irrigar, desta forma promove o aumento da produtividade e rentabilidade com eficiência no uso da água, energia e dos fertilizantes. Assim, evita que a planta seja exposta ao estresse hídrico, o que, dependendo do estágio vegetativo, poderá comprometer significativamente sua produção.

A sonda de capacitância Diviner 2000 (Sentek Pty Ltda., Austrália) tem sido bastante utilizada para medir a umidade do solo em profundidades diferentes no mesmo ponto e em alguns segundos. Consequentemente, seu uso em áreas irrigadas tem se ampliado na última década em áreas agrícolas para subsidiar o manejo de irrigação em cana-de-açúcar, feijão, algodão, arroz e milho. Monitoramento da umidade do solo em bacias ao longo do tempo também é objeto de aplicação desta sonda, desde que devidamente calibrada para um determinado tipo de solo, considerando a influência da composição química e física do solo em suas leituras (SILVA et al., 2007; SILVA JUNIOR et al., 2016).

Entre as culturas de maior relevância para o agronegócio brasileiro está a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). No entanto, a cada ano seu cultivo é comprometido em virtude dos crescentes custos dos insumos e da falta de tecnologias alternativas e inovadoras para impulsionar a produtividade. Deste modo, os produtores buscam aumentar sua produção por hectare para não diminuir sua rentabilidade (FRAGA JÚNIOR, 2015). O problema não é a falta de tecnologia no setor canavieiro, e sim a adequação das variedades de cana-de-açúcar às condições edafoclimáticas existentes no território brasileiro para seu cultivo, pois já existem variedades com elevado potencial de produção e longevidade.

Por outro lado, o momento da renovação do canavial representa um impacto financeiro significativo no que diz respeito ao volume de mudas necessárias (11 a 14 t ha⁻¹), para compensar o aumento das falhas no estande de plantas durante o plantio mecânico (GAZOLA et al., 2017). Assim, o maior custo da lavoura de cana-de-açúcar é atribuído a aquisição de mudas, cerca de 20% (RESENDE e LEITE, 2016). Nesse sentido, uma alternativa para reduzir o volume de mudas de cana-de-açúcar e melhorar a qualidade fitossanitária das mesmas, seria plantar as gemas de colmos pré-brotadas, comumente denominadas mudas pré-brotadas (MPB). Essas gemas por serem menos volumosas são facilmente transportáveis e representam uma grande promessa na multiplicação rápida de novas variedades de cana-de-açúcar (LANDELL et al., 2012; SILVA et al., 2015; MATOSO

et al., 2016).

O uso das MPBs reduz a quantidade final de mudas utilizadas nos plantios definitivos, pois Gomes (2013) afirma que com esse tipo de muda usa-se apenas 2 t ha⁻¹ de colmos de cana. Isso significa que, pelo menos 9 t ha⁻¹ irão para a indústria produzir etanol e açúcar, gerando ganhos diretos e indiretos para a cadeia produtiva canavieira.

Estudos recentes apontam para uma indefinição sobre o manejo de irrigação no cultivo de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. Sampaio et al. (2015) utilizaram irrigação automatizada com lâmina de 4 mm dia⁻¹ em Goiás, enquanto Landell et al. (2012) em pesquisa no Instituto Agrônomo de Campinas - SP recomendam 8 mm dia⁻¹. As lâminas e os turnos de irrigação são definidos de acordo com o desenvolvimento das plantas, portanto novos estudos são necessários para comprovar a eficiência do manejo envolvendo tipos de solos e variedades de acordo com a região a ser implantada (SILVA et al., 2015; ARAÚJO NETO et al., 2017).

Além disso, em regiões áridas, semiáridas ou com distribuição pluviométrica irregular, característica do nordeste brasileiro, é fundamental o uso da irrigação para aumentar a produtividade da cultura (LECHINOSKI et al., 2007). Por conseguinte, resulta em menor armazenamento de água no solo durante o período seco, comprometendo assim as variáveis biométricas da cana-de-açúcar como a altura de planta, número e diâmetro de colmos, número de folhas, área foliar e, conseqüentemente, a produtividade (DANTAS NETO et al., 2006; SILVA et al., 2008; ABREU et al., 2013).

Outro fator crucial para o desenvolvimento e aumento da produtividade da cana-de-açúcar é o manejo da adubação, principalmente o de nitrogênio, uma vez que este, junto ao potássio são os nutrientes exigidos em maiores quantidades para o crescimento e desenvolvimento da cultura (PEDULA et al., 2016). Entretanto, a aplicação inadequada de adubação nitrogenada em culturas comerciais, como a cana-de-açúcar, tem influenciado negativamente a produtividade e incentivado a busca por estratégias que visem não apenas o aumento da eficiência de utilização do nitrogênio, mas também a melhoria da rentabilidade e da sustentabilidade do canavial (AMARAL e MOLIN, 2013; URIBE et al., 2016).

Em relação a absorção e aproveitamento do nitrogênio na zona radicular estão relacionados aos processos de perdas, como a lixiviação, escoamento e volatilização (BRACKIN et al., 2015; RHEIN et al., 2016). Assim, a decisão de quais formas de nitrogênio (N) disponibilizar às plantas, como nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺), é importante por possibilitar o aumento da eficiência na adubação nitrogenada, através do conhecimento da

demanda nutricional, dinâmica de nutrientes na cultura, redução de custos e, dinâmica dos fertilizantes no solo (MARIANO et al, 2015).

Vale ressaltar que, a utilização da adubação nitrogenada em um ciclo produtivo de cana-de-açúcar é bastante reduzida, limitando-se em até 30% do aproveitamento do nitrogênio pela cultura. Devido à grande interação do nutriente com o ambiente, o que pode reduzir a eficiência das adubações, visto que as perdas de N podem ocorrer através de atividades microbianas, lixiviação, volatilização e nitrificação (TRIVELIN et al., 1995; PRASERTSAK et al., 2002).

Com isto, a prática de aplicação de fertilizantes na cana-de-açúcar, principalmente os nitrogenados, passou a ser realizada mais frequentemente em cima da palhada, ou seja, do resíduo deixado pela colheita mecanizada. Com isso, a ureia, fertilizante tradicionalmente utilizado na cultura, passou a apresentar elevadas perdas por volatilização de amônia (COSTA et al., 2003; MARIANO et al., 2012).

Com a finalidade de obter maior eficiência no uso dos fertilizantes nitrogenados, e aumentar a produtividade de cana-de-açúcar, outras fontes nitrogenadas vêm sendo avaliadas na cultura, como o sulfato de amônio, nitrato de amônio, nitrato de amônio e cálcio (MARIANO et al., 2016). No entanto, as respostas à adubação nitrogenada da cana-de-açúcar são ainda imprecisas, apesar de ser um elemento essencial para o crescimento vegetal e aumento de produtividade desta cultura. Portanto, novos estudos são necessários para identificar uma fonte nitrogenada que otimize o uso deste nutriente pela cultura, o que dependerá das características químicas do solo, a ser utilizado para a produção da cultura, principalmente o pH pois, é um fator primordial que condiciona e assegura a absorção deste nutriente pela planta.

2. HIPÓTESES

1) O monitoramento da umidade do solo em tempo real, com o uso de sensores eletrônicos, para fins de irrigação, proporciona a racionalização do uso de água e insumos;

2) A determinação precisa da umidade do solo e, conseqüentemente, da lâmina de irrigação, resulta em ganhos no crescimento vegetativo e aumento da eficiência de uso de água;

3) As plantas de cana-de-açúcar sob adubação com nitrato de amônio resultam em maior crescimento, quando comparadas com as plantas supridas exclusivamente com amônio, por meio do sulfato de amônio.

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de diferentes sensores eletrônicos de umidade do solo na determinação da lâmina de água visando elevar a precisão no manejo de irrigação, como também avaliar os aspectos morfogênicos no crescimento inicial da cana-de-açúcar sob diferentes fontes nitrogenadas.

3.1. Objetivos específicos

3.3.1. Calibrar sensores de capacitância para diferentes tipos de solos;

3.3.2. Determinar a lâmina de água por meio dos sensores de umidade do solo para os diferentes tipos de solo e comparar com a equação de calibração dos fabricantes;

3.3.3. Avaliar mensalmente as variáveis biométricas no crescimento inicial da cana-de-açúcar sob diferentes estratégias de irrigação e fontes nitrogenadas;

3.3.4. Definir o melhor método de determinação de lâmina de irrigação via sensores de umidade do solo e fonte nitrogenada baseada a maior eficiência do uso da água para as variáveis de massa fresca e seca no crescimento inicial de cana-de-açúcar.

CAPÍTULO I

REVISÃO DE LITERATURA

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Água na produção agrícola

A Agência Nacional das Águas - ANA (2017b) afirma que a atividade agropecuária no Brasil é a principal atividade responsável pelo uso da água. A grande participação do setor agrícola no consumo de água, em torno de 67%, se explica principalmente pelo emprego desse recurso na irrigação. Dentre as principais culturas irrigadas no país encontra-se a cana-de-açúcar, cerca de 29% da área cultivada com esta cultura na região do nordeste é irrigada. Segundo Cooley et al. (2009) e a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura FAO (2017), a agricultura irrigada precisa aprimorar os métodos de gestão da água, especialmente, frente ao cenário de mudanças climáticas.

O Brasil possui extensão territorial de mais de 4,5 milhões de hectares, com potencial para serem irrigados. O sistema de irrigação quando bem dimensionado e executado possibilita o aumento da produção agrícola como também a eficiência no uso da água. Atualmente, a produtividade média das culturas produzidas no país em áreas irrigadas é pelo menos 2,7 vezes maior que a obtida através da agricultura de sequeiro, que depende do regime de chuvas que não é regular e muito menos constante (FAO, 2017). Esta informação corrobora o trabalho de Oliveira et al. (2011) conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina-PE que obteve produtividade média de onze variedades de cana-de-açúcar em torno de 2,5 vezes maior na área irrigada em relação ao sequeiro, sendo que, a variedade RB92579 produziu 2,7 vezes mais sob irrigação.

Moura et al. (2005) encontraram efeitos positivos na cana-de-açúcar sob irrigação quando comparado em cultivo de sequeiro, em solos de tabuleiros costeiros do estado da Paraíba, em termos de rendimento de colmos. O sistema de irrigação utilizado foi pivô central com turno de rega de 12 dias e observaram que a produtividade média dos colmos para o regime com e sem irrigação foi de 92 t ha⁻¹ e 77 t ha⁻¹, respectivamente. O cultivo de sequeiro reduziu em aproximadamente 20% a produtividade de colmos.

O sistema de integração solo – água – planta – atmosfera é importante para estabelecer metodologias e critérios para o manejo de irrigação. O momento certo para a aplicação e quantidade de água proporciona o aumento da produtividade, o uso racional da água, energia e insumos agrícolas (HERNANDEZ, 1994). A água e o solo são fundamentais para as atividades agrícolas e o manejo racional é determinante para a agricultura sustentável. Portanto, a quantificação da umidade do solo é necessária para indicar a disponibilidade de

água adequada para a planta, o que contribui para o rendimento ótimo e econômico da cultura.

Diante disso, o conhecimento das propriedades físico-hídricas dos solos são fundamentais para o estabelecimento de práticas agrícolas, como a implementação de técnicas e manejo de irrigação adequado para a otimização do uso da água, energia e insumos (PADRÓN et al., 2015). Entre as propriedades físicas do solo, a textura é uma das mais influentes na adsorção e/ou manutenção da água no solo (CREMON et al., 2014). Além disso, também interfere na compactação, aeração, disponibilidade de nutrientes e na estabilidade dos agregados. Os solos de textura arenosa possuem espaço poroso constituído predominantemente por macroporos (poro com diâmetro $> 0,08$ mm), o que indica maiores perdas por lixiviação de nutrientes e baixa retenção de água (FREITAS et al., 2014).

4.2. Automação na agricultura irrigada

O sistema de irrigação manual tradicional apresenta desvantagens em relação ao sistema automatizado, seja em virtude do custo em dispor de operador para essa função, seja em função da eficiência, uma vez que, o acionamento manual geralmente é realizado de forma irregular e sem o devido controle. Consequentemente, poderão ser aplicadas lâminas excessivas ao solo, causando a lixiviação, ou deficitárias, permitindo que se esgote grande parcela da água disponível armazenada no solo, entre uma irrigação e outra (MACEDO et al., 2010). Segundo Boutraa et al. (2011), quando se utiliza irrigação automatizada o rendimento é maior quando comparado com áreas manualmente irrigadas. Entretanto, o monitoramento automático para manejo racional da água de irrigação, embora atualmente disponível, não é acessível à maioria dos produtores, por questão de custo de aquisição, erros e falhas na programação (SILVEIRA e STONE, 2001).

Na agricultura brasileira a utilização de tecnologias no processo de monitoramento e automação da irrigação é uma realidade, porém ainda precede de altos investimentos e mão de obra qualificada (SOUSA et al., 2017). Além disso, os produtores se interessam em equipamentos práticos e de baixo custo, capazes de serem instalados sem maiores dificuldades e que cumpram as funções de controle e automação (CAVALCANTE et al., 2011).

A adoção da prática de irrigação para a cana-de-açúcar pode estar inserida dentro de um contexto no qual outras tecnologias sejam utilizadas, a fim de garantir maior produtividade, menor custo e maior eficiência do uso da água. Na região semiárida,

considerando que o recurso hídrico é um fator limitante, a eficiência do uso da água pela cultura deve ser otimizada (OLIVEIRA et al., 2016).

Diante disso, o sistema de irrigação para ser considerado vantajoso deve evitar desperdício de água e distribuir a água de maneira eficiente ao longo do cultivo. Inúmeros fatores interferem na técnica de irrigação e afetam diretamente a decisão sobre o momento e a quantidade de água usada, dentre elas o tipo de solo e a necessidade de água pela espécie vegetal irrigada (FERREIRA et al., 2016).

Atualmente, os microcontroladores têm sido utilizados em pesquisas no campo da irrigação automatizada, e a plataforma ARDUINO vem se destacando por ser econômica e disponível comercialmente. Esta plataforma é capaz de interagir com o ambiente através da entrada de sensores que medem variáveis do solo, planta e atmosfera, assim, podem fornecer informações importantes para a estimativa das lâminas de irrigação; como também possibilita a criação de projetos de outras naturezas (CAVALCANTE et al., 2011; CORREIA et al., 2016; RODRIGUEZ et al., 2017; SOUSA et al., 2017).

Para cada cultura existe recomendação de frequência fixa de irrigação, de acordo com a literatura, o que facilita a programação das operações. No entanto, esse método pode acarretar tanto déficits como excessos de água, pois as condições climáticas são variáveis a cada ano. Diante disso, o uso de ferramentas no campo que determinem, direta ou indiretamente, o conteúdo de água no solo é essencial para as culturas, conforme as condições ambientais predominantes durante o desenvolvimento das fases fenológicas das mesmas (FARIA e COSTA, 1987).

4.3. Determinação da umidade no solo

O solo é um corpo natural sólido e poroso constituído por macroporos e microporos (ocupados por ar e água) e por agregados que são formados de partículas unitárias, cimentadas entre si por matéria orgânica e minerais. A porosidade do solo tem atuação direta na retenção de água e de nutrientes, pois os tamanhos de partículas influenciam na capacidade de armazenamento no solo (NOVAIS e MELLO, 2007).

O conhecimento do teor de água no solo é de grande importância econômica e ambiental para agricultura sustentável, pois viabiliza maior eficiência no manejo de irrigação. O fornecimento de água para a planta passa a ser mais adequado quando se conhece a necessidade hídrica da mesma, evitando tanto o déficit quanto o excesso hídrico, o que

contribui para a redução de gastos com água e energia (SILVA et al., 2012; SILVA JÚNIOR et al., 2013; RESENDE et al., 2017).

Os métodos para quantificação da umidade do solo são classificados em diretos e indiretos. O método direto (Gravimétrico) consiste em estimar a umidade do solo pela diferença entre a massa úmida e a massa seca em estufa a 105 – 110 °C (EMBRAPA, 2017). Os métodos indiretos estimam a quantidade de água a partir dos sensores como os de resistência elétrica, os de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e de frequência (sonda de capacitância ou FDR), e os de reflexão ou emissão de radiação (LIMA e SILVA, 2012). Nos últimos anos a utilização desses sensores vem ganhando espaço, pois é um dos meios mais precisos para acompanhar o conteúdo de água no solo, e sua aplicação tem trazido várias contribuições à agricultura (CRUZ et al., 2010).

O manejo sustentável da irrigação pode ser alcançado quando o monitoramento do conteúdo de água no solo é realizado de forma precisa, por meio de sensores dielétricos do tipo FDR. Esses equipamentos oferecem uma alternativa prática e econômica quando comparado aos outros dispositivos baseados na moderação de nêutrons e TDR, que também são considerados métodos precisos para determinar o teor de água do solo (TOPP, 2003; DOBRIYAL et al., 2012).

As equações que convertem as leituras elétricas realizadas pelos sensores em conteúdo volumétrico de água no solo, recomendadas pelos fabricantes, de forma geral, não apresentam máxima efetividade na coleta de dados pois, frequentemente sub ou superestimam a umidade real do solo. Essa variação nas leituras deve-se à sensibilidade dos sensores em função da condutividade elétrica do solo, textura, matéria orgânica, entre outros fatores, sendo necessário portanto, a realização da calibração específica para cada tipo de solo a ser estudado (ROSENBAUM et al., 2011). Os sensores da Decagon ECH2O, modelo EC-5 e 5TE, são equipamentos precisos, desenvolvidos para a determinação do conteúdo de água, com medições contínuas e não destrutivas, além disso, o 5TE também mensura a condutividade elétrica (DIAS et al., 2005; SCUDIERO et al., 2012).

Pesquisa realizada por Oliveira et al. (2016) objetivou avaliar o uso da técnica de sensores eletrônicos para estimar a umidade de solo cultivado com cana-de-açúcar irrigada e avaliar a extração de água promovida pelas plantas durante o período de maturação. Os autores concluíram que o método foi eficiente para monitorar a dinâmica e a estimativa de água no solo. Além disso, a comparação dos dados de extração de água com os valores de densidade de raízes demonstrou que esta ferramenta pode ser utilizada para indicar de forma

qualitativa em que profundidades há maior atividade radicular.

Entretanto, os sensores de umidade se comportam de maneira diferente em cada tipo de solo, podendo registrar valores acima ou abaixo das medidas reais, ou seja, a exatidão das leituras destes sensores depende não somente da qualidade do aparelho como também da calibração do mesmo, a qual varia de acordo com o tipo de solo utilizado (GAVA et al., 2016).

4.4. Sensores de capacitância

A utilização de sensores eletrônicos para o monitoramento de água do solo tem sido indicada, pois são de fácil manuseio, rapidez nos resultados e ainda é possível repetir as medições em um determinado ponto do perfil do solo em tempo real (SILVA et al., 2008). Barbosa et al. (2012) afirmam que os sensores de umidade do solo estão sendo bastante empregados na agricultura, por sua elevada exatidão no monitoramento do conteúdo de água no solo, o que pode contribuir para maior eficiência na aplicação da quantidade de água necessária e no tempo correto.

Os sensores do tipo capacitância têm seu princípio de funcionamento baseado na capacitância elétrica entre duas ou mais placas paralelas dos condutores separadas por um meio dielétrico (solo), em resposta a variação de alguma propriedade física. A partir da medida de frequência, a permissividade relativa do solo pode ser determinada e consequentemente seu conteúdo de água através de uma equação de calibração. A aplicação destes sensores tem-se difundido bastante em pesquisas relacionadas à irrigação por ser, entre outros aspectos, um método não destrutivo (BARBOSA et al., 2012).

De acordo com Lima e Silva (2012), os sensores FDR e TDR obtém, em tempo real, dados como umidade do solo em diferentes profundidades e intervalos de tempo, e podem ser armazenados em dataloggers. O instrumento FDR têm maior flexibilidade do que os equipamentos do tipo TDR no que se refere à forma e frequência de operação dos mesmos, admitindo a construção de sondas multisensores sendo, portanto, uma excelente ferramenta para o monitoramento da umidade do solo.

O sensor de capacitância fornece uma onda eletromagnética de 70 MHz aos pinos que são carregados de acordo com o dielétrico do solo ao redor do sensor. Uma carga é consequentemente armazenada nos dentes e é proporcional ao dielétrico do solo. Versões anteriores de sensores dielétricos da Decagon Devices, operavam em frequências mais

baixas, que acabam diminuindo sua sensibilidade, por exemplo, sonda ECH2O10, 5 MHz (SCUDIERO et al., 2012).

Dean et al. (2012) afirmam que os sensores de capacitância estão sendo utilizados cada vez mais devido a facilidade de medição, a capacidade de registros de dados como também por não terem riscos à saúde como os métodos baseados em radiação. A desvantagem da técnica da determinação da umidade do solo por meio do princípio da FDR se refere à necessidade de calibração local (BARBOSA et al., 2012).

4.4.1. Calibração de sensores

A realização da calibração dos sensores é indispensável para os solos a serem monitorados, em virtude das diferenças físicas e químicas que os mesmos apresentam. O trabalho conduzido por Barbosa et al. (2012) em laboratório, com Cambissolo e Argissolo, confirma a necessidade de calibração para solos de textura diferentes, pois a equação adotada pelo fabricante do sensor ECH2O superestimou os valores de umidade do solo para faixas superiores a 10%. Essas calibrações podem ser realizadas em laboratórios e são bastante representativas, pois são utilizadas amostras não deformadas que preservam as características físicas do solo, como estrutura, densidade e aeração, em sua forma original.

Nesse sentido, o uso da técnica da FDR é apropriado para a obtenção do conteúdo de água no solo em um Latossolo Vermelho, conforme Silva Junior et al. (2013), desde que, seja realizada a calibração específica para o mesmo. Os solos mais intemperizados possuem altos teores de óxido de ferro o que interfere nos resultados, em virtude da presença elevada de cargas positivas no solo que afetam a constante dielétrica e, conseqüentemente, a umidade estimada, por isso, há necessidade de correção dos parâmetros de calibração do fabricante.

Os trabalhos desenvolvidos com a utilização de sondas das mais diversas marcas mostram tendência na alteração das leituras da permissividade complexa do solo, pela alteração na condutividade elétrica, como observado no trabalho desenvolvido por Scudiero et al. (2012) e Rosenbaum et al. (2011), na Itália e Espanha, respectivamente. Esses resultados evidenciam a necessidade de correção das leituras realizadas em meio altamente condutivo. Da mesma maneira, em solo com diferentes granulometrias, conforme verificado por Souza et al. (2013) com sondas FDR e TDR para estimar a umidade em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo, os valores de umidade do solo subestimaram e superestimaram, respectivamente, com as sondas, quando comparados com o método padrão (gravimétrico). Como também, Gava et al. (2016) encontraram desvio de leitura do

sensor de umidade para a medida real, em diferentes tipos de solos, no qual foi de -8% para o solo de textura argilosa e de -4% para o solo de textura arenosa.

Segundo Andrade Junior et al. (2007) ao calibrarem uma sonda de capacitância (Diviner 2000) utilizada em um Latossolo Amarelo proveniente da microrregião do Litoral Piauiense, obtiveram uma equação ajustada por análise de regressão, relacionada significativamente com as medidas do equipamento, com alta correlação e coeficiente de determinação. Esta proximidade pode ser explicada devido ao fato do fabricante ter usado em sua calibração dados obtidos de solos arenosos, muito semelhantes, em termos de retenção de água, como o solo que foi testado no experimento.

Diante disso, a utilização de sensores com calibração específica, para um determinado tipo de solo, possibilita o manejo adequado da irrigação e, conseqüentemente, o favorecimento da condutância estomática e transpiração, bem como o aumento da taxa de fotossíntese, influenciando no crescimento da planta e aumento da produtividade (BEIS e PATAKAS, 2015). Dentro desse contexto, alguns estudos (HOCHBERG et al., 2015; SILVA et al., 2015; OLIVEIRA, 2018) relatam o incremento de produtividade quando se relacionou aspectos fisiológicos e lâminas de irrigação determinadas com base na umidade volumétrica do solo.

4.5. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é considerada de grande relevância para o agronegócio brasileiro. O Brasil é o maior produtor mundial da cultura, com safra 2019/2020 estimada em 640 milhões de toneladas, acréscimo de 3,6% em relação à safra anterior 2018/2019. O país é responsável por mais de 50% do açúcar comercializado no mundo, sendo a região nordeste a terceira maior produtora do país, com 43,5 milhões de toneladas na safra 2018/2019, e com prognóstico de aumento para a safra 2019/2020 de 12,6% (CONAB, 2019).

Atualmente, a RIDESA (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético) conta com 79 bases de pesquisa, englobando Laboratórios das Universidades, Estações de Cruzamento, Estações Experimentais e Bases de Seleção, sendo essas últimas conduzidas em parceria com as empresas do setor canavieiro. Esse órgão de pesquisa apresenta resultados altamente significativos para o setor canavieiro nacional, destacando-se a modernização da mecanização agrícola e industrial, controle biológico de pragas, calibração de macro e micronutriente presentes nos solos e recomendação de calagem

e adubação da cana-de-açúcar, como também a otimização de processos industriais na fabricação de açúcar e álcool. Além disso, o setor de melhoramento genético tem se destacado em virtude da sua significativa contribuição para o desenvolvimento das cultivares RB, sigla registrada no Germplasm Committee of International Society of Sugar Cane Technologists - ISSCT. As variedades de cana-de-açúcar RB's ocupam 68% dos 9 milhões de hectares cultivados no Brasil. As três variedades mais utilizadas no país entre as RB's são: RB867515, RB966928 e RB92579. Na região do nordeste a variedade mais cultivada é a RB92579, e no estado de Pernambuco, ocupa cerca de 28% da área de plantio de cana-de-açúcar (RIDEA, 2018).

O volume de colmos necessários para implantar ou renovar o canavial está se tornando sucessivamente antieconômico, pois cerca de 8 a 12 toneladas por hectare são utilizadas (FRAGA JÚNIOR, 2015). No entanto, na prática, com a intenção de reduzir o risco de falhas no canavial utiliza-se de 15 a 21 gemas.metro⁻¹, o que se traduz em 11 a 14 t.ha⁻¹ de cana-de-açúcar, principalmente, com o advento do plantio mecânico, as falhas se tornaram mais frequentes. Esta grande massa de material para o plantio aumenta o risco de difusão de pragas e doenças por meio da muda, dificultando o controle fitossanitário (GAZOLA et al., 2017).

A utilização de colmos com presença de doença e/ou pragas causa baixa eficiência dos métodos de produção de mudas de cana-de-açúcar que torna sua propagação lenta e seu custo elevado, pois exige maior utilização de produtos fitossanitários no campo. Desta maneira, formar mudas sadias é fundamental, pois influência na percentagem de sobrevivência, na velocidade e crescimento da fase inicial, como também na produção final da cana-de-açúcar (MARCO et al., 2016).

O plantio convencional apresenta também problemas no transporte, movimentação e armazenamento de sementes de cana-de-açúcar, que sofre rápida deterioração, reduzindo a viabilidade de gemas plantadas posteriormente (FRAGA JÚNIOR, 2015). Uma alternativa para melhorar a qualidade das mudas de cana-de-açúcar seria plantar colmos com gemas pré-brotadas, popularmente conhecido como sistema de mudas pré-brotadas (MPB). Essas gemas são menos volumosas e facilmente transportáveis. Além disso, esta tecnologia é uma grande promessa na multiplicação rápida de novas variedades de cana-de-açúcar. O uso de MPB resulta em excelente padrão clonal, ou seja, maior homogeneidade no estande canavial (LANDELL et al., 2012; SILVA et al., 2015; MATOSO et al., 2016).

4.5.1. Plantio de mudas pré-brotadas (MPB)

O plantio comercial de cana-de-açúcar é feito por meio da propagação vegetativa. As gemas ficam em estado latente, pois são reservas nutricionais, hídricas e de hormônios vegetais, havendo condições edafoclimáticas favoráveis a gema se torna ativa e inicia-se o crescimento e desenvolvimento da planta (CARVALHO e NAKAGAWA, 2000). Além disso, a quantidade de sacarose presente no material propagativo está diretamente relacionada com o seu material de reserva, o qual é de fundamental importância à germinação (SILVA et al., 2004).

A implantação convencional de cana-de-açúcar utiliza-se pedaços de colmos conhecido como reboło que têm tamanho variável de 30 a 50 cm (LANDELL et al., 2012). As reservas dos rebolos são fundamentais, principalmente no período de 60 dias DAP (dias após o plantio), para o processo de brotação, e à medida que o sistema radicular e a parte aérea desenvolvem, aumenta conseqüentemente a superfície ativa de absorção de água e nutrientes do solo, tornando assim uma planta autotrófica (JADOSKIL et al., 2012).

O plantio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar ainda é uma técnica recente no setor canavieiro. A formação do viveiro envolve a multiplicação rápida da cultura como também é uma alternativa simples que pode ser adotada por pequenos produtores e associações, não ficando restrito ao grande produtor, pois esse material promove maior produtividade e qualidade. Além disso, as mudas do viveiro passam por um processo de pré seleção de gemas com o objetivo de diminuir os riscos de disseminação de pragas e doenças (SILVA et al., 2015).

O Instituto Agronômico de Campinas (IAC) em 2009, que desenvolveu este sistema, transformou um conceito de séculos de plantio ao retirar o uso de reboło como semente e introduzir uma planta que, neste caso, é a muda pré-brotada. Essa tecnologia foi repassada para os produtores no ano de 2015. O IAC recomenda que as gemas do sistema MPB devem ser provenientes de viveiros sem mistura varietal e com idade fisiológica de 6 a 10 meses (LANDELL et al., 2012).

Segundo, Sampaio et al. (2015), a utilização de mini-rebolos de cana-de-açúcar com tamanho de 2 e 3 cm se mostrou mais eficaz para a formação das mudas pré-brotadas, evidenciando assim a influência do material de reserva presente. Ao analisar a média da emergência ao longo do experimento constatou-se que, aos 19 dias após o plantio (DAP) foram atingidos os valores máximos de porcentagem de emergência. Algumas plântulas ainda continuaram a emergir durante o experimento mas não apresentaram grau de

significância. Desta forma, constataram também que, em nenhum tratamento houve mortalidade das plântulas emergidas. Portanto, a emergência da cana-de-açúcar é mais rápida com a utilização de mudas pré-brotadas do que a implantação convencional.

As mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar podem ser plantadas de forma manual ou mecânica, desde que estejam em condições ideais para serem plantadas. Algumas características importantes nessa fase é o vigor e enraizamento, pois minimizam problemas com estresse hídrico e aumentam a velocidade de desenvolvimento da fase inicial no campo. Neste sistema, as mudas pré-brotadas, após 60 dias do início do processo de produção, já podem ser destinadas ao campo. A forma de distribuição espacial das mudas nas áreas de cultivo, espaçamento de 1,5 x 0,5 m, induz ao melhor aproveitamento dos recursos hídricos e nutricionais, o que reduz a competição intraespecífica estabelecida em canaviais com excesso de mudas, situação bastante comum em áreas comerciais de plantio mecanizado (LANDELL et al., 2012).

4.5.2. Necessidade hídrica da cultura

A disponibilidade hídrica na fase inicial da cultura de cana-de-açúcar é um dos fatores extrínsecos para o estabelecimento durante o estágio vegetativo. Ramesh (2000) conduziu um experimento em Coimbatore (Índia) durante as safras de 1996 e 1997 mostrando o efeito da umidade no ciclo da cana-de-açúcar. Os tratamentos compreenderam três níveis de umidade durante a fase de formação vegetativa de 60-150 dias após plantio: 1º Sem irrigação (controle); 2º Irrigação a 80% de depleção da umidade do solo disponível; 3º Irrigação a 50% de depleção da umidade do solo disponível. Após os 150 dias todas as áreas utilizaram a mesma quantidade de água do tratamento 3. A redução no teor de matéria seca no estágio final de formação, crescimento vegetativo e maturação foi de 60,8, 52,4 e 25,9%, respectivamente, na área sem irrigação e 46,3, 36,3 e 15,1% no 2º tratamento, respectivamente, quando comparado ao tratamento controle. O autor afirma que a mensuração de variáveis de crescimento como taxa de assimilação líquida, taxa de crescimento relativo e índice de área foliar em condições normais de irrigação, particularmente durante a fase de formação, pode ajudar a prever matéria seca total na colheita.

Pesquisa conduzida em casa de vegetação, no município de Presidente Prudente – SP, com cana-de-açúcar RB867515 irrigada, teve como objetivo avaliar o desenvolvimento inicial da cultura, em função de diferentes lâminas de irrigação (50, 75, 100, 125 e 150% da

evapotranspiração da cultura – ETc). Os autores concluíram que a relação entre massa seca e lâmina de irrigação aplicada resultou na maior eficiência do uso da água no tratamento que utilizou 50% da evapotranspiração da cultura (ALEMAN e SOUSA, 2015).

A irrigação influencia tanto na fase inicial de crescimento como o início do máximo desenvolvimento da primeira soca da cana-de-açúcar. Pesquisa realizada com cana-de-açúcar no estado da Paraíba obteve resultados significativos em relação ao desenvolvimento vegetativo quando cultivada sob irrigação. O crescimento da cana-de-açúcar quando irrigada estabilizou-se aproximadamente com 193 dias com altura de 152 cm, já sob o sistema de sequeiro as plantas cresceram até os 236 dias e mediram em média 148 cm (DANTAS NETO et al., 2006). De acordo com Farias et al. (2008), a produção da fitomassa de raízes também é maior em áreas irrigadas, cerca de 10% a mais e, 75% das raízes encontravam-se nos primeiros 45 cm de profundidade na área irrigada.

De acordo com Doorembos e Kassam (1994), o rendimento satisfatório de cana-de-açúcar produzida em condições de sequeiro nos trópicos úmidos varia entre 70 a 100 t ha⁻¹ e nos trópicos e subtropicais secos, com irrigação, entre 100 e 150 t ha⁻¹. Os autores afirmam que para o ciclo desta cultura é necessário pluviosidade entre 1.500 a 2.000 mm.ano⁻¹.

No experimento conduzido por Oliveira et al. (2011), na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina/PE, foi avaliada a produtividade de colmos e de açúcar de variedades de cana-de-açúcar submetidas ao regime de sequeiro, sob índice pluviométrico de 1.141,4 mm no ano, e a irrigação plena usou mais 255,2 mm durante o ciclo da cultura, totalizando 1.396,6 mm de água utilizada no canavial. As variedades RB92579 e SP81-3250 de maturação média à precoce se destacaram quanto à eficiência do uso da água em regime hídrico de 1.396,6 mm. A produtividade de colmos das variedades RB92579, RB72454 e SP813250 apresentaram ganhos superiores a 180% com uso da irrigação, o que promoveu aumentos na produtividade de açúcar superiores a 200% nas variedades RB92579 e RB943365.

Na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento de Jaú/SP, Gava et al. (2011) conduziram experimento com o objetivo de avaliar a produtividade de três variedades de cana-de-açúcar sob dois sistemas de manejo (irrigado e sequeiro). A média de produtividade de colmos (TCH) dos três genótipos estudados (RB867515; RB855536 e SP80-3280) foi de 132,2 t.ha⁻¹ para o manejo irrigado por gotejamento e de 106,5 t ha⁻¹ para o manejo de sequeiro, no primeiro ciclo de cultivo (2006/2007), sendo que no segundo ciclo (cana-soca) a média de TCH sob os dois sistemas foi de 126,2 e 90,8 t ha⁻¹, respectivamente.

4.5.3. Adubação nitrogenada

A adubação nitrogenada é uma prática usual nos cultivos canavieiros, pois o nitrogênio (N) é o elemento nutricional mais limitante ao perfilhamento, crescimento e desenvolvimento da cultura, conforme amplamente estudado por meio do rendimento da cana-de-açúcar em resposta ao fornecimento de N (TRIVELIN, 2000; FRANCO et al., 2015), sendo considerado inclusive, segundo Mariano et al. (2016), o segundo nutriente mais extraído pela cultura.

No entanto, um dos fatores que mais afeta a rentabilidade da cultura da cana-de-açúcar são os custos com adubação e, particularmente, a nitrogenada. Uma das alternativas para otimizar economicamente o uso de um insumo específico é determinar sua dose ótima econômica. A cana-de-açúcar, no Brasil, é fertilizada com doses entre 60 a 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio, enquanto em outros países com produtividades comparáveis, as doses são geralmente superiores a 120 kg ha⁻¹ de N e, em alguns casos, atingem 200 kg ha⁻¹ de N (ESPERANCINI et al., 2015). Isto se deve às condições favoráveis de solo e clima do Brasil, para o uso de menores doses de N em cana-de-açúcar, e como também aos avanços em pesquisas relacionadas com fixação biológica de nitrogênio (FBN) no país e as suas implicações com a agricultura tropical (DÖBBEREINER e DUQUE, 1980; DÖBBEREINER, 1990; CANTARELLA e ROSSETTO, 2010; SCHULTZ et al., 2016; MATOSO et al., 2016; SIMÕES et al., 2018).

Uma das fontes nitrogenadas utilizada nos canaviais é a ureia, devido ao seu menor custo por unidade de N. Contudo, é a fonte que mais sofre perdas consideráveis de N-NH₃ por volatilização (COSTA et al., 2003; MARIANO et al., 2012). Outras fontes são empregadas no cultivo de cana-de-açúcar, como o sulfato de amônio e nitrato de amônio, porém, o sulfato tem elevado potencial de acidificação do solo (MARIANO et al., 2016).

Segundo Gírio et al. (2015), o fornecimento de nitrogênio favorece o crescimento inicial da parte aérea até os 180 dias após o transplântio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, pois aumenta o perfilhamento, a altura, o diâmetro e a produção da matéria seca do colmo. O aumento do número de perfilhos na cana-de-açúcar na fase inicial de desenvolvimento está relacionado, principalmente, a sua superprodução natural que, no decorrer do desenvolvimento da cultura, sofrem morte natural devido à competição intraespecífica (MACHADO et al., 1982). Resultados semelhantes foram obtidos por Megda et al. (2012), ao avaliar a eficiência agrônômica de adubos nitrogenados em cana-de-açúcar.

Estudo realizado por Costa et al. (2003) com diferentes fontes nitrogenadas para adubação de cana-de-açúcar, em Piracicaba/SP, indicou que os tratamentos com ureia e, ureia + sulfato apresentaram maiores perdas de N-NH_3 por volatilização, conseqüentemente menores respostas em relação a produtividade da cultura.

As plantas, de forma geral, têm capacidade de absorver o nitrogênio do ambiente por meio de diversas formas como amônio, nitrato e aminoácidos. No entanto, a principal via de entrada deste elemento nas culturas é pela absorção radicular de nitrato e amônio (EPSTEIN; BLOOM, 2006). A preferência da cana-de-açúcar pelo nitrato ou amônio depende de vários fatores, pois a eficiência de algumas fontes nitrogenadas é função do tipo de solo utilizado. Além disso, quando a absorção do nitrogênio pela cultura é na forma de amônio, a assimilação do N não exige gasto energético como ocorre na forma de nitrato, visto que o nitrato precisa ser reduzido a amônio dentro das células (BRITTO; KRONZUCKER, 2013).

No entanto, a absorção de amônio em elevadas quantidades gera efeito negativo no crescimento das plantas, podendo causar possível toxidez, pois provoca desordens na regulação do pH celular e acidificação da zona radicular (WALCH-LIU et al., 2000), competição na absorção com outros cátions, como o potássio e o aumento do consumo de carbono pelas raízes (TEN HOOPEN et al., 2010). Além de que, em solos tropicais os fertilizantes a base de amônio propendem a nitrificar mais rapidamente (MARIANO et al., 2015), ou seja, a forma de absorção pela planta, neste caso, é o nitrato. Nesse sentido, pode ser questionada a real preferência de absorção e eficiência de uso do amônio para a cana-de-açúcar.

Desta forma, o suprimento conjunto de nitrato e amônio pode favorecer o crescimento e a nutrição da cana-de-açúcar, comparado com o suprimento exclusivo dessas formas de nitrogênio. No entanto, as proporções ótimas de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ dependem da cultura, do estágio de desenvolvimento e das concentrações fornecidas de nitrogênio (TEN HOOPEN et al., 2010).

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**, v. 27, n. 3, p. 31-34, 2013. DOI: 10.1590/brag.2013.028

ALEMAN, C. C.; MARQUES, P. A. A. Irrigation and organic fertilization on the production of essential oil and flavonoid in chamomile. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v. 20, n. 12, p. 1045-1050, 2016. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n12p1045-1050

ALEMAN, C. C.; SOUSA, D. Aspectos morfogênicos no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar RB 867515 irrigada. **Colloquium Agrariae**, v. 11, n.2, p.12-18, 2015. DOI: 10.5747/ca.2015.v11.n2.a121.

AMARAL, L. R. do.; MOLIN, J. P. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 1, p. 273-280, 2013. DOI: 10.2134/agronj2012.0504

ANA- Agência Nacional de Águas. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: 2017a.

ANA- Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: Relatório pleno/ Agência Nacional de Águas**. Brasília: ANA, p. 53-60, 2017b.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; SILVA, C. R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Belém - PA, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007.

ARAÚJO NETO, J. M.; FRAGA JÚNIOR E. F.; LIVORATTO, C. L. B.; CRIPPA, V. M; REZENDE, M. S.; FREITAS, L. J. **Produção de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar em diferentes frequências de irrigação**. IV INOVAGRI International Meeting, 2017.

BARBOSA, M. A. G. B.; FIQUEREDO, V. B.; MEDEIROS, J. F.; NASCIMENTO, I. B. CARVALHO, B. L.; PALÁCIO, V. C. **Calibração de sensor FDR ECH2O para determinação da umidade em dois tipos de solos**. IV INOVAGRI International Meeting, 2012.

BEIS, A; PATAKAS, A. Differential physiological and biochemical responses to drought in grapevines subjected to partial root drying and deficit irrigation. **European Journal of Agronomy**, v. 62, n. 1, p. 90-97, 2015. DOI: 10.1016/j.eja.2014.10.001

BENETT, C. G. S.; BUZETTI, A.; BENETT, K. S. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; COSTA, N. R.; MAEDA, A. S.; ANDREOTT, M. Acúmulo de nutrientes no colmo de cana-de-açúcar em função de fontes e doses de manganês. **Semina Ciências Agrárias**, v. 34, n. 3, p. 1077-1088, 2013. DOI: 10.5433/1679-0359.2013v34n3p1077

BOUTRAA, T.; AKHKHA, A.; ALSHUAIBI, A.; ATTA, R. Evaluation of the effectiveness of an automated irrigation system using wheat crops. **Agriculture and Biology Journal of**

North America, v. 2, n. 1, p. 80-88, 2011. DOI: 10.5251/abjna.2011.2.1.80.88

BRACKIN, R.; NÄSHOLM, T.; ROBINSON, N.; GUILLOU, S.; VINALL, K.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S.; INSELSBACHER, E. Nitrogen fluxes at the root-soil interface show a mismatch of nitrogen fertilizer supply and sugarcane root uptake capacity. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 15727, 2015. DOI: 10.1038/srep15727

BRITO, R. A. L. **Avaliação do Desempenho de sistemas e projetos de irrigação**. In: Albuquerque, P. E. P. e Durães, F. O. M. Uso e manejo de irrigação. Brasília, DF: Embrapa, 2008. cap. 8, p. 401-419, 2008.

BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H.J. Ecological significance and complexity of N- sources preference in plants. **Annals of Botany**, v. 112, p. 957-963, 2013.

CALVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino da Física**, v. 33, n. 4, p. 1-9, 2011. DOI: 10.1590/S1806-11172011000400018

CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. **Fertilizantes para cana-de-açúcar**. In: CORTEZ, Luis Augusto Barbosa (Coord.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2010.

CARVALHO, C. M.; GOMES FILHO, R. R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 3, n. 1, p. 3-12, 2009. DOI: 10.7127/rbai.v3n100012

CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 4º edição. Jaboticabal: FUNEP. p. 59-64, 2000.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v. 6 - Safra 2019/2020, n. 3 - Terceiro levantamento, Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, 2019.

COOLEY, H., CHRISTIAN-SMITH, J., GLEICK, P. H. **Sustaining California agriculture in an uncertain future**. Pacific Institute, Oakland, CA, p. 1-81, 2009.

CORREIA, G. R.; ROCHA, H. R. de O.; RISSINO, S. das D. Automação de sistema de irrigação com monitoramento via aplicativo web. **Engenharia na agricultura**, v. 24, n. 4, p. 314 – 325, 2016. DOI: 0.13083/1414-3984/reveng.v24n4p314-325

COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 631-637, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000400007

CREMON, C.; LONG, L.; MAPELI, N. C.; SILVA, L.A.M.; SILVA, W.M. Determinação da umidade de diferentes solos do Pantanal Matogrossense via micro-ondas e método padrão. **Revista Agrarian**. Dourados, v. 7, n. 24, p. 280-288, 2014.

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C., OLIVEIRA,

- A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010. DOI: 10.1590/S0100-69162010000100004
- DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. da C.; FARIAS, C. H. de A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A.V. de. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 283-288, 2006. DOI: 10.1590/S1415-43662006000200006
- DEAN, R. N.; RANE, A. K.; BAGINSKI, M. E.; RICHARD, J.; HARTZOG, Z.; ELTON, D.J. A Capacitive fringing field sensor design for moisture measurement based on printed circuit board technology. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. v. 61, n. 4, p. 1005-1112, 2012. DOI: 10.1109/TIM.2011.2173041.
- DIAS, N. da S.; DUARTE, S. N.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. de.; SOARES, T. M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 496-504, 2005. DOI: 10.1590/S1415-43662005000400009
- DÖBBEREINER, J. Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil. **Estudo Avançado**, v. 4, n. 8, 1990. DOI: 10.1590/S0103-40141990000100011
- DÖBBEREINER, J.; DUQUE, F. F. Contribuição da pesquisa em fixação biológica de nitrogênio para o desenvolvimento do Brasil. **Revista Economia Rural**, v. 18, n. 03, p. 447-460, 1980.
- DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**, v. 458, n. 1, p. 110-117, 2012. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.021
- DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 306 p., 1994.
- DURSUN, M.; OZDEN, S. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. **Scientific Research and Essays**. v. 6, n. 7, p. 1573-1582, 2011.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 3ª edição, 2017, 574 p.
- EPSTEIN; E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006, 403 p.
- ESPERANCINI, M.S.T.; AFONSO, P.F.N.; GAVA, G.J.C.; BOAS, R.L.V. Dose ótima econômica de nitrogênio em cana-de-açúcar aplicada via fertirrigação por gotejamento. **Revista Irriga**, Botucatu, Edição Especial, 20 anos Irriga + 50 anos FCA, p. 28-39, 2015. DOI: 10.15809/irriga.2015v1n1p28
- EVETT, S.; IBRAGIMOV, N.; KAMILOV, B.; ESANBEKOV, Y.; SARIMSAKOV, M.; SHADMANOV, J.; MIRHASHIMOV, R.; MUSAEV, R.; RADJABOV, T.; MUHAMMADIEV, B. **Soil moisture neutron probe calibration and use in five soils of Uzbekistan**. 17th WCSS, 14-21 August 2002, Thailand. Symposium n° 59 Paper n° 839.

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. Brasília, 2017.

FARIAS, C. H. A. de; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M. de; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008. DOI: 10.1590/S1415-43662008000400004

FARIA, R. T. de; COSTA, C. S. da. **Tensiômetro: construção, instalação e utilização - um aparelho simples para se determinar quando irrigar**. Londrina: IAPAR, 1987. 24 p. (Circular Técnica, 56).

FERREIRA, B. O.; OKABE, A. M. S.; SILVA, A. J. C. da.; ALMEIDA, J. F. S. de.; CHASE, O. A. **Irrigação automatizada com plataforma arduino em casa de vegetação na universidade federal rural da Amazônia**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC), Foz do Iguaçu: CONTECC, p. 1-5. 2016.

FRAGA JÚNIOR, E. F. **Considerações sobre o manejo de irrigação na produtividade e qualidade de gemas de cana-de-açúcar para viveiros de mudas pré-brotadas (MPB)**. Tese (Doutorado em Ciência). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FARONI, C.E.; OLIVEIRA, E. C. A.; FORTES, C.; FERREIRA, D. A.; KÖLLN, O. T.; GARSIDE, A. L.; TRIVELIN, P. C. O. Residual recovery and yield performance of nitrogen fertilizer applied at sugarcane planting. **Scientia Agrícola**, v. 72, n. 6, p. 528-534, 2015. DOI: 10.1590/0103-9016-2015-0170

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J.C.; OLIVEIRA, I.A.; CAMPOS, M.C.C. Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrária**, v. 57, n. 3, p. 224-233, 2014. DOI: 10.4322/rca.ao1357

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

GAVA, R.; SILVA, E. E. da.; BAIIO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2016.

GAZOLA, T; CIPOLA FILHO, M. L.; FRANCO JUNIOR, N. C. Avaliação de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar provenientes de substratos submetidos a adubação química e orgânica. **Revista Científica**, v. 45, n. 3, p. 300-306, 2017. DOI: 10.15361/1984-5529.2017v45n3p300-306.

GÍRIO, L. A. da S.; DIAS, F. L. F.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S.; SCHULTZ, N.; BOLONHEZI, D.; MUTTON, M. A. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré-brotadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 33-43, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000100004.

GOMES, C.; Cana-de-açúcar, Sistema Muda Conceito de Plantio. **Revista A Lavoura**, n. 696; p. 38-39; 2013.

HENG, L.K.; CAYCI, G.; KUTUK, C.; ARRILLAGA, J. L.; MOUTONNET P. **Comparison of soil moisture sensors between neutron probe, Diviner 2000 and TDR under tomato crops**. 17th WCSS, 14-21 August 2002, Thailand. Symposium n° 59 Paper n° 1539.

HERNANDEZ, F. B. T. **Manejo da irrigação por pivô central na cultura do milho**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24, 1994, Viçosa/MG.: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 13 p., 1994. (Artigo 286).

HOCHBERG, U.; DEGU, A.; CRAMER, G. R.; RACHMILEVITCH, S.; FAIT, A. Cultivar specific metabolic changes in grapevines berry skins in relation to deficit irrigation and hydraulic behavior. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 88, n. 1, p. 42-52, 2015. DOI: 10.1016/j.plaphy.2015.01.006

JADOSKI, C. J.; BRAGANTI, E. V.; RODRIGUES, J. D. Desenvolvimento morfofisiológico de raízes e brotos da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 11, n. 2, p 22-32, 2012. DOI: 10.18188/sap.v11i2.4563

LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; PERY, F.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A.; DINARDO-MIRANDA; L. L.; SCARPARI, M. S.; GARCIA, J. C.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, D. N.; MENDONÇA, J. R.; KANTHACK, R. A. D.; CAMPOS, M. F.; BRANCALIAO, S. R.; PETRI, R. H.; MIGUEL, P. E. M.; **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Ribeirão Preto: Instituto Agronômico de Campinas, 2012.

LECHINOSKI, A.; FREITAS, J. M. N. de.; CASTRO, D. da S.; LOBATO, A. K. da S.; OLIVEIRA NETO, C. F. de.; CUNHA, R. L. M. Influência do estresse hídrico nos teores de proteínas e aminoácidos solúveis totais em folhas de Teca (*Tectona grandis* L. f.). **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, supl. 2, p. 927-929, 2007.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de Latossolos do Cerrado em Condições de Campo. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17 n. 1, p. 23-32, 2012. DOI: 10.21168/rbrh.v17n1.p23-32

MACEDO, A. B. M.; MIRANDA, G. R.; GOMES FILHO, R. R.; TEXEIRA, A. S.; CAVALCANTE, J. A. H.; ARAUJO, H. F. Desempenho de um sistema de irrigação automatizado através da tensão de água no solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, n. 2, p. 78-81, 2010.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J. L.; ARRUDA, H.V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana de açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 9, p. 1323-1329, 1982.

MARCO, E.; MATOSO, E. S.; BELLÉS, C.; RODRIQUES, T. A.; SILVA, S. D. A. Influência do tratamento térmico no desenvolvimento inicial de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Revista da 13ª Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa Congrega**. Bagé – RS, 2016.

MARIANO, E.; LEITE, J. M.; MEGDA, M. X.; TORRES-DORANTE, L.; TRIVELIN, P. C. Influence of nitrogen form supply on soil mineral nitrogen dynamics, nitrogen uptake, and productivity of sugarcane. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 641-650, 2015. DOI: 10.2134/agronj14.0422

MARIANO, E.; TRIVELIN, P.C.O.; VIEIRA, M.X.; LEITE, J.M.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 411-419, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000200010

MARIANO, E.; LEITE, J.M.; VIEIRA-MEGDA, M.X.; CIAMPITTI, I.A.; VITTI, A.C.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O. Biomass and nutrient content as sugarcane as affected by fertilizer nitrogen sources. **Crop Science**, v. 56, n. 3, p. 1234-1244, 2016. DOI: 10.2135/cropsci2015.06.0349

MATOSO, E. S.; MARCO, E.; BELLÉS, C.; RODRIQUES, T. A.; SILVA, S. D. A. Desenvolvimento inicial de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas. **Revista da 13ª Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa Congrega**. Bagé – RS, 2016.

MEGDA, M. X. V.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C. Eficiência agrônômica de adubos nitrogenados em soqueira de cana-de-açúcar colhida sem queima. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 47, n. 12, p. 1681-1690, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012001200002.

MOURA, M. V. P. da S.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, C. A. V. de; PONTES NETO, J.; AZEVEDO, H. M. de; PORDEUS, R. V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência Agrotécnica**, v. 29, n. 4, p. 753-760, 2005.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. **Relação solo-planta**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 134-198, 2007.

OLIVEIRA, A. B. **Consumo hídrico e calibração/validação do modelo aquacrop para a cultura do coentro submetido à irrigação localizada**. 2018. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

OLIVEIRA, A. R. de.; BRAGA, M. B.; SANTOS, B. L. S.; WALKER, A. M. Biometria de cultivares de cana-de-açúcar sob diferentes reposições hídricas no Vale do Submédio São Francisco. **Revista Energia na Agricultura**, v. 31, n. 1, p. 48-58, 2016. DOI: 10.17224/EnergAgric.2016v31n1p48-58

OLIVEIRA, E. C. de; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C. de; SIMÕES NETO, D. E.; ROCHA, A. T. da; CARVALHO, L. A. de. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 6, p. 617-625, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011000600007

PADRÓN, R. A. R.; NOGUEIRA, H. M. C. M.; CERQUERA, R. R.; ALBINO, G. D.; NOGUEIRA, C. U. Caracterização físico-hídrica do solo Argissolo Amarelo para

estabelecimento de projeto e manejo da irrigação. **Acta Iguazu**, v. 4, n. 1, p. 36-47, 2015.

PEDULA, R. O.; SCHULTZ, N.; MONTEIRO, R. C.; PEREIRA, W.; DE ARAÚJO, A. P.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M. Growth analysis of sugarcane inoculated with diazotrophic bacteria and nitrogen fertilization. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 30, p. 2786-2795, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.11141

PRASERTSAK, P.; FRENEY, J. R.; DENMEAD, O. T.; SAFFIGNA, P. G.; PROVE, B. G.; REGHENZANI, J. R. Effect of fertilizer placement on nitrogen loss from sugarcane in tropical Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 62, n. 3, p. 229-239, 2002. DOI: 10.1023/A:1021279309222

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, n. 2, p. 83-89, 2000. DOI: 10.1046/j.1439-037x.2000.00404.x

RESENDE, H.; LEITE, J. L. B. **Tecnologia e Custo da Cana-de-açúcar para a Alimentação Animal**. Juiz de Fora -MG, p. 1-16, 2016.

RESENDE, R. S.; BATISTA, W. R. M.; AMORIM, J. R. A. Calibração do sensor de capacitância Diviner 2000 utilizando tubos de acesso padrão e alternativo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. Fortaleza, Edição Especial, IV INOVAGRI International Meeting, p. 1662 - 1669, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n500745

RHEIN, A. F.; PINCELLI, R. P.; ARANTES, M. T.; DELLABIGLIA, W. J.; KÖLLN, O. T.; SILVA, M. D. A. Technological quality and yield of sugarcane grown under nitrogen doses via subsurface drip fertigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 209-214, 2016. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p209-214

RIDESA. Censo Varietal Brasil – 2017/18. Rede interuniversitária para o desenvolvimento do setor sucroenergético, São Paulo, 2018. Disponível em < <https://www.ridesa.com.br/censo-varietal> >. Acessado em 8 de maio de 2020.

RODRIGUEZ, D.; RECA, J.; URRESTARAZU, M. Automatic Irrigation Control System for Soilless Culture Based on Feedback from Drainage Hydrograph. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 4, n. 33, p. 531-542, 2017. DOI: 10.13031/aea.11172.

ROMÁN, R. M. S.; SILVA, N. F. da.; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; RIBEIRO, P. H. P. Produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes reposições hídricas e nitrogênio em dois ciclos. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 198-210, 2015. DOI: 10.15809/irriga.2015v1n1p198

ROSENBAUM, U.; HUISMAN, JA.; VRBA, J.; VEREECKEN, H.; BOGENA, H.R. Correction of temperature and electrical conductivity effects on dielectric permittivity measurement with ECH₂O sensors. **Vadose Zone Journal**. v. 10, n. 2, p. 582-593, 2011. DOI: 10.2136/vzj2010.0083

SAMPAIO, L.; PORTO, G. S.; PRADO, R. L.; SILVEIRA, L. A da.; GOLYNSKI, A.;

MEGGUER, C. A. **Emergência de plântulas de cana-de-açúcar no sistema de mudas pré brotadas**. IV Congresso Estadual de Iniciação Científica do IF Goiano, 2015.

SCHULTZ, N.; PEREIRA, W.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S. S. Produtividade e diluição isotópica de ¹⁵N em cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1594-1601, 2016. DOI: 10.1590/s0100-204x2016000900059

SCUDIERO, E.; BERTI, A.; TEATINI, P.; MORARI, F. Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe. **Sensors**, v. 12, n. 12, p. 17588-17607, 2012. DOI: 10.3390/s121217588.

SILVA JUNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; SCALCO, M. S.; SILVA, B. M.; LIMA, P. T. Calibração de sondas de capacitância para determinação de umidade em Latossolo Vermelho Distroférrico. **Revista Irriga**, v. 18, n. 4, p. 743-755, 2013. DOI: 10.15809/irriga.2013v18n4p743

SILVA JUNIOR, V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; MELO, R. O. Temporal stability of soil moisture in an experimental watershed in the Pernambuco semiarid region. **Revista Brasileira de Engenharia. Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 10, p. 880-885, 2016. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n10p880-885

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA JÚNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p.277-286, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000200017

SILVA, C. R. da; ANDRADE JÚNIOR, S. de A.; SOUZA, C. F. **Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem**. In: SOUZA, C. F.; VARALLO, A. C. T.; LOPES, L. N.; SANTORO, B. L. (Org.). Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental. Taubaté: Universidade de Taubaté - UNITAU, 2008, v. 1, p. 25-45, 2008.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, A. B.; MELO, F. B.; COELHO FILHO, M. A. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **Scientia Agrícola**, v. 64, n. 6, p. 636-640, 2007. DOI: 10.1590/S0103-90162007000600012.

SILVA, L. G.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; SANTOS, R. A. **Produção de mudas pré brotadas (MPB) de cana-de-açúcar em diferentes estratégias de irrigação**. XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. UFS - São Cristóvão/SE, 2015.

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

SILVA, M. A.; SILVA, J. A. G. da.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 6, p. 620-627, 2008. DOI: 10.1590/S0103-90162008000600008

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. **Irrigação do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001. 230 p.

SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R.; REIS, V. M.; PEREIRA, W.; LIMA, J. A. Aplicação de bactérias diazotróficas via sistema de irrigação para fixação biológica de nitrogênio na cana-de-açúcar. **Revista Energia na Agricultura**, v. 33, n. 1, p. 45-51, 2018. DOI: 10.17224/EnergAgric.2018v33n1p45-51

SOUSA, R. L. de.; CALCA, M. V. C.; PAI, A. D. **Automação de sistema de irrigação por gotejo com arduino em cultivo de lúpulo**. In: 6ª Jornada Científica e Tecnológica da FATEC de Botucatu, p. 1- 2, 2017.

SOUZA, E. J. de.; CUNHA, F. F. da.; MAGALHÃES, F. F.; SILVA, T. R. da.; BORGES, M. C. R. Z.; ROQUE, C. G. Métodos para a estimativa da umidade do solo na capacidade de campo. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 43-50, 2013.

STARR, J. L.; TIMLIN, D. J.; DOWNEY, P. M.; McCANN, I. R. Laboratory evaluation of dual-frequency multisensor capacitance probes to monitor soil water and salinity. **Irrigation Science**, v. 27, n. 5, p. 393-400. 2009. DOI: 10.1007/s00271-009-0154-3

TEN HOOPEN, F.; CUIN, T. A.; PEDAS, P. P.; HEGELUND, J. N.; SHABALA, S.; SCHJOERRING, J. K.; JAHN, T. P. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and *Arabidopsis* roots: molecular mechanisms and physiological consequences. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 9, p. 2303-2315, 2010. DOI: 10.1093/jxb/erq057

TOPP, G.C. State of the art of measuring soil water content. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 14, p. 2993-2996, 2003. DOI: 10.1002/hyp.5148

TRIVELIN, P. C. O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com o uso do traçador 15N**. 2000. 143 f. Tese (Livre-Docência) -Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L.; RODRIGUES, J. C. S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 12, p. 1375-1385, 1995.

URIBE, R. A. M.; DE CASTRO GAVA, G. J.; KÖLLN, O. T.; SAAD, J. C. C. Estimativa do acúmulo de fitomassa da soqueira de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de n-fertilizante utilizando modelo de simulação. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 126-126, 2016. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n1p126-139

VARBLE, J. L.; CHÁVEZ, J. L. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. **Agricultural Water Management**, v. 101, n. 1, p. 93-106, 2011. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.09.007

WALCH-LIU; P.; NEUMANN, G.; FRITZ, B.; ENGELS, C. Rapid effect of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 343, p. 227-237, 2000.

WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 169-181, 2004. DOI: 10.1016/S0378-3774(03)00192-6

CAPÍTULO II

DESEMPENHO DE SONDAS DE CAPACITÂNCIA NA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA EM SOLOS AGRÍCOLAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO

RESUMO: O conhecimento e monitoramento do conteúdo de água no solo são de fundamental importância para o manejo da irrigação, o qual é facilitado quando se dispõe de sensores eletrônicos que estimam em tempo real o conteúdo de água no solo. Para tanto, o objetivo desta pesquisa foi calibrar três sensores de umidade do solo em dois tipos de solos com classes texturais distintas, franco argilo arenosa e areia, visando otimizar o desempenho dos mesmos no monitoramento do conteúdo de água no solo para fins de irrigação. O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Os solos utilizados foram coletados em amostras deformadas e não deformadas, na profundidade de 0-0,30 m, no município de Goiana (PE). Os sensores de umidade de solo do tipo capacitivo Diviner 2000® e ECH₂O (EC-5 e 5TE), foram instalados verticalmente em quatro vasos, para cada tipo de solo, submetidos à saturação por capilaridade. Em seguida, os vasos foram colocados em uma bancada, para drenagem do excesso de água, e assim serem realizadas as primeiras pesagens e leituras de umidade do solo, representando a umidade equivalente à capacidade de campo. Diariamente, e em horário fixo (8 h), foram realizadas as pesagens e a leitura de cada sensor eletrônico. Os resultados foram submetidos à análise de regressão e, os índices estatísticos de Willmott, RMSE, coeficiente de determinação e erro médio foram utilizados para avaliar a qualidade do ajuste entre os valores medidos (umidade gravimétrica) e estimados pelos sensores de umidade de solo. Os sensores apresentaram equações de calibração de modelo linear para ambos os solos, e as análises apontaram boa correlação entre as leituras de umidade volumétrica medida e a estimada para ambos os solos com R^2 acima de 0,94. O uso das equações de calibração específicas para os solos estudados reduz os erros das leituras dos sensores resultando em valores de RMSE 0,01 m³ m⁻³ para todos os sensores avaliados em ambos os solos, exceto o 5TE na areia que obteve RMSE 0,02 m³ m⁻³. Esse resultado reforça a necessidade de calibrar os sensores capacitivos ECH₂O, modelos EC-5 e 5TE, e Diviner para diferentes tipos de solos, de modo que podem ser uma ferramenta útil para auxiliar o manejo de irrigação, já que a calibração do fabricante subestimou os valores reais de umidade do solo para o solo de textura franco argilo arenosa enquanto que na areia tais valores foram superestimados.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação; Calibração; Instrumentação; FDR; Umidade do solo.

PERFORMANCE OF THREE CAPACITANCE PROBES IN DETERMINING WATER CONTENT IN AGRICULTURAL SOILS OF THE STATE OF PERNAMBUCO

ABSTRACT: The knowledge and monitoring of the soil water content are of fundamental importance for the irrigation management, which is facilitated when electronic sensors are available that estimate in real time the soil water content. For this purpose, the objective of this research was to calibrate three soil moisture sensors in two types of soils with different textural classes, sandy clay loam and sandy, aiming to optimize their performance in monitoring the soil water content for irrigation purposes. The experiment was carried out in a protected environment, at the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE). The soils used were collected in disturbed and undisturbed samples, at 0-0.30 m depth, in the city of Goiana (PE). The capacitive soil moisture sensors Diviner 2000® and ECH2O (EC-5 and 5TE), were positioned vertically in the pots, with four replicates for each type of soil and subjected to capillarity saturation. When saturation was reached, they were placed on a bench to allow excess water to drain and then, were weighed and the respective soil moisture reading was performed, representing moisture equivalent to field capacity. Weighing and reading each electronic sensor was performed daily and at a fixed time (8 am). The results were subjected to regression analysis and statistical indexes of Willmott, RMSE, determination coefficient and mean error were used to assess the quality of the fit between the measured values (gravimetric moisture) and estimated by soil moisture sensors. The sensors presented linear model calibration equations for both soils, and the analyzes showed a good correlation between the measured volumetric moisture and the estimated for both soils with R^2 above 0.94. The use of site-specific calibration equations for the studied soils reduces the errors of the sensor readings resulting in RMSE values $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for all sensors evaluated in both soils, except the 5TE in sandy soil that obtained RMSE $0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. This result reinforces the need to calibrate the capacitive sensors ECH2O and Diviner for different type of soils, so that they can be a useful tool to assist the irrigation management, since the manufacturer's calibration underestimated the real values soil water content for sandy clay loam soil, while in sandy soil these values were overestimated.

KEYWORDS: Irrigation; Calibration; Instrumentation; FDR; Soil moisture.

INTRODUÇÃO

O conhecimento do conteúdo de água disponível no solo é de fundamental importância para a produtividade agrícola, que irá influenciar o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento da cultura, principalmente em áreas irrigadas, pois corresponde a quantidade de água que deverá ser aplicada na irrigação. Portanto, métodos que avaliam de forma precisa e instantânea as variações no armazenamento de água sob diferentes condições do solo são essenciais (SOUZA et al., 2019)

O armazenamento de água no solo pode ser medido por meio de métodos diretos e indiretos. Segundo Lima et al. (2018), o método direto é destrutivo e demorado para obter os resultados, pois consiste em coletas de amostras de solo no campo; e as análises são feitas em laboratório. Já os métodos indiretos são de fácil operacionalidade, onde a estimativa da umidade do solo é obtida de forma instantânea, o que pode contribuir para a aplicação da quantidade de água necessária e no tempo correto. Além disso, alguns sensores eletrônicos possuem a vantagem em automatizar o sistema de irrigação, pois auxilia na otimização e eficiência do uso da água, assim como, na diminuição de custos de mão de obra.

Sistemas de irrigação automatizados baseados em sensores de reflectometria no domínio da frequência FDR têm sido utilizados para pesquisas sobre eficiência de irrigação (BURNETT e VAN IERSEL, 2008; BAYER et al., 2013; KANG et al., 2019). Os sensores FDR são constituídos de um par de eletrodos (um polo positivo e um negativo) que produz um campo eletromagnético ao redor dos eletrodos, com isso é possível medir a frequência da onda refletida que varia de acordo com a umidade do solo (CRUZ et al., 2010; BÖHME et al., 2013). São vários os modelos de sensores do tipo FDR, que têm sido utilizados no monitoramento da umidade do solo para fins de manejo da irrigação, com leituras rápidas e precisas, entre eles a Diviner 2000®, 5TE e EC-5 (DEAN et al., 2012; SINGH et al., 2018).

A leitura obtida pelos sensores depende da proporção de solo, água e ar no volume do solo investigado (KINZLI et al., 2012; HABERLAND et al., 2014), por isso, os sensores devem estar devidamente instalados no solo. Pesquisa realizada por Provenzano et al. (2016) com a finalidade de comparar a calibração de sensores do tipo FDR realizada em laboratório e em campo para vários tipos de solos, constataram que a calibração em laboratório apresenta maior exatidão e menor erro médio absoluto na determinação do conteúdo de água volumétrica quando comparada com a realizada em campo.

O desempenho dos sensores FDR difere em função do tipo de solo no qual está inserido, em virtude das suas particularidades, tanto pela diferença na granulometria,

salinidade, mineralogia como pela quantidade de matéria orgânica, pois essas são características físico-químicas do solo que influenciam na determinação da sua permissividade (VAZ et al., 2013). Os sensores da Decagon Devices utilizam a equação proposta por Topp et al. (1980) para converter o valor da permissividade dielétrica em umidade volumétrica em um meio poroso. No caso do solo, este valor se encontra entre 2 e 5, o ar próximo de 1 e a água 80, desta forma obtém-se o valor da umidade volumétrica (BOYER e KRAMER, 1995). Segundo Regalado et al. (2003), o modelo de Topp et al. (1980) não é satisfatório em solos com alta superfície específica pois apresentam valor da permissividade dielétrica atípica devido ao aumento da fração de água adsorvida.

A equação padrão adotada pelo fabricante da Diviner 2000 é uma função exponencial baseada nos dados obtidos para os tipos de solo areia, argila arenosa e substrato orgânico. Esta sonda cria um campo elétrico de alta frequência, no raio de 10 cm partindo do tubo de acesso instalado no solo, para medir a umidade do solo, a fim de relacionar as escalas de leituras de frequência da Diviner 2000 ao conteúdo volumétrico de água no solo (SENTEK, 2011). De acordo com Primo et al. (2015), o monitoramento da frequência escalada (SF) no solo pode ser utilizado na estimativa do conteúdo de água, pois os valores de SF obedecem a mesma tendência da umidade volumétrica do solo.

Consequentemente, mesmo que existam as equações de calibração recomendadas pelos fabricantes, se faz necessário realizar uma calibração específica, considerando a particularidade de cada local, e assim obter resultados mais precisos e exatos na determinação do conteúdo de água no solo. Vários estudos têm sido realizados, nesse sentido, confirmando a confiabilidade da calibração específica com nível de exatidão relativamente alto (SILVA et al., 2007; LIMA FILHO et al., 2013; SOUZA et al., 2013; VAZ et al., 2013; PRIMO et al., 2015).

Posto isto, objetivou-se com esta pesquisa calibrar os sensores capacitivos Diviner 2000® e ECH₂O, modelos EC-5 e 5TE, em dois tipos de solo, de textura franco argilo arenosa e areia e, comparar seus desempenhos, visando otimizar a utilização dos mesmos no monitoramento do conteúdo de água no solo para fins de irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em ambiente protegido, na Estação de Fertirrigação e Salinidade, do Departamento de Engenharia Agrícola – DEAGRI da Universidade Federal

Rural de Pernambuco (UFRPE), campus Recife-PE (8° 01' 07" de latitude Sul e 34° 56' 53" de longitude Oeste, altitude de 6,50 m).

Amostras de solo foram coletadas na camada superficial (0-0,30 m), no município de Goiana (PE), em áreas com solos classificados como Latossolo Amarelo e Neossolo Flúvico, conforme mapa da distribuição geográfica das classes de solos do estado de Pernambuco, no primeiro nível categórico, adaptado ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018). De acordo com o triângulo textural do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (LEMOs e SANTOS, 1984), as classes texturais dos solos foram classificadas em franco argilo arenosa e areia para o Latossolo Amarelo e Neossolo Flúvico, respectivamente (Tabela 1). Posteriormente, o solo foi seco ao ar, em ambiente ventilado, destorroado e peneirado em malha de 4,75 mm. Para análises físico-químicas, amostras de solo deformadas foram encaminhadas ao Laboratório Soluções Agrícolas e Integradas (SOLOAGRI). As amostras de solo não deformadas foram coletadas em anéis de volume 100 cm³ (5 cm de diâmetro x 5 cm de altura) utilizando um amostrador adaptado tipo Uhland. Essas amostras foram utilizadas para determinar a densidade do solo no Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Agronomia da UFRPE e definir assim, a quantidade de solo a ser acondicionada nos vasos.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos para caracterização dos solos estudados.

Tabela 1: Parâmetros físicos e químicos para caracterização dos solos estudados.										
Solos	Classe Textural	Frações granulométricas			Ds g cm ⁻³	MO g kg ⁻¹	CE dS m ⁻¹	pH (água) 1:2,5	Al ⁺³ cmol _c dm ⁻³	Na ⁺ cmol _c dm ⁻³
		Areia	Silte	Argila						
		----- g kg ⁻¹ -----								
Latossolo Amarelo	Franco argilo arenosa	660	100	240	1,54	3,8	0,09	4,6	0,55	0,01
Neossolo Flúvico	Areia	900	40	60	1,51	47,6	0,58	4,6	0,05	0,06

Ds = densidade do solo; MO = matéria orgânica do solo; CE = condutividade elétrica do extrato de saturação; Al⁺³ = alumínio; Na⁺ = sódio.

O experimento foi conduzido em oito vasos de polietileno com capacidade volumétrica de 7,8 L (altura de 23,5 cm, diâmetro inferior de 16 cm e diâmetro superior de 25 cm), nos quais foi acondicionado o solo, sendo quatro repetições para cada tipo de solo. A base dos recipientes foi previamente perfurada, a fim de permitir a drenagem do excesso de água. O preenchimento dos vasos foi realizado, inicialmente, com uma camada de brita

com 3,5 cm de espessura e manta geotêxtil (bidim). Em seguida, foi adicionado o solo, numa determinada proporção, de modo a manter a densidade média do campo, considerando o volume do recipiente ocupado com solo de 5,9 L, a massa de solo úmido do franco argilo arenosa foi equivalente a 9,6 kg e a massa do solo areia foi de 8,4 kg (equação 1). Para o preenchimento dos vasos com o solo utilizou-se uma balança eletrônica com precisão de $\pm 2,0$ g.

$$M_{su} = D_s \times f \times V \quad (1)$$

Em que:

M_{su} - massa de solo úmido (g);

D_s - densidade do solo (g cm^{-3});

f - fator de correção (calculado por meio da razão entre terra fina seca ao ar e terra fina seca em estufa);

V - volume útil do vaso (cm^3).

Adicionalmente, foram instalados dois sensores de umidade de solo do tipo capacitivo ECH2O, modelos EC-5, cujas dimensões são 8,9 cm comprimento, 1,8 cm largura e 0,7 cm de espessura, e 5TE (Decagon Devices, IncTM), cujas dimensões são 10 cm de comprimento, 3,2 cm de largura e 0,7 cm de espessura. Além disso, foi instalado tubo de acesso de PVC (Sentek Pty Ltda., Austrália), com 56,5 mm de diâmetro externo, 51 mm de diâmetro interno e 50 cm de comprimento, ao centro de cada vaso, para uso da sonda FDR Diviner 2000[®] (Sentek Pty Ltda., Austrália) (Figura 1).

Figura 1. Posicionamento dos sensores ECH2O, modelos 5TE e EC-5, e do tubo de acesso da Diviner 2000 para monitoramento da umidade do solo nos vasos.



Conforme a recomendação do fabricante foi feita a normalização da Diviner, por meio do registro das leituras da frequência dentro de um tubo de PVC suspenso no ar

(182922), mergulhado na água (125678) e no solo (177450). A saída dos dados é então denominada de frequência escalada (SF), definida pela equação 2:

$$SF = \frac{(Fa-Fs)}{(Fa-Fw)} \quad (2)$$

Em que:

SF - frequência escalada;

Fa - contagem da frequência pela sonda no tubo de PVC, totalmente suspenso no ar;

Fs - contagem da frequência pela sonda no tubo de PVC no solo;

Fw - contagem da frequência pela sonda no tubo de PVC imerso em água.

Os sensores foram posicionados de forma vertical, mantendo 5 cm de distância das paredes do vaso, conforme recomendado pelo fabricante, e 5 cm de distância do tubo de acesso que foi instalado ao centro de cada vaso. Posteriormente, os vasos preenchidos com solos foram submetidos a saturação por capilaridade, e em seguida colocados em uma bancada no ambiente protegido a fim de permitir a drenagem do excesso de água. Ao cessar a drenagem cada vaso foi pesado e efetuadas as primeiras leituras de cada um dos três sensores para iniciar o processo de calibração propriamente dito, considerando esta a umidade equivalente à capacidade de campo.

Os vasos foram pesados diariamente e em horário fixo (8 h) para calcular a massa de água presente no solo, por meio da diferença das pesagens diárias e a massa do conjunto (vaso + solo + brita + bidim + sensores + tubo de acesso), e posteriormente eram realizadas as leituras de umidade de solo por meio dos sensores, durante 35 dias, até que a variação diária de massa dos mesmos tornou-se insignificante. Para tanto, utilizou-se uma balança eletrônica, com precisão de $\pm 2,0g$. Para calcular o conteúdo gravimétrico de água no solo foi utilizado o método padrão, adotando-se a equação (3).

$$U = \frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \quad (3)$$

Em que:

U - umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$);

Mss - massa de solo seco (g);

Msu - massa de solo úmido (g).

As equações de calibração dos sensores foram geradas por meio de análise de regressão relacionando as leituras diárias dos sensores e as respectivas umidades volumétricas calculadas com base na umidade gravimétrica (método padrão) e densidade do solo. Para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos de estimativa da umidade do solo foi realizado os seguintes índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), erro médio (EM) por meio da equação (4) e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), equação 5.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (5)$$

Em que:

n = número de dados da amostra;

P_i = valor estimado pelo sensor de umidade do solo ($m^3 m^{-3}$);

O_i = valor medido pelo método padrão ($m^3 m^{-3}$).

Além disso, foi utilizado o índice de Willmott (1981), conhecido como índice de concordância (d) (equação 6), e o coeficiente de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997). Segundo esses autores o coeficiente de correlação (r) indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, e, o grau de exatidão (d) está associado ao desvio entre valores estimados e medidos. Assim, o produto entre “ r ” e “ d ” resulta no coeficiente de desempenho (c) que avalia a qualidade do ajuste entre os valores de umidade de solo medidos e os estimados pelos sensores, cujo resultado é interpretado conforme classificação apresentada na Tabela 2.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (6)$$

Em que:

d = coeficiente de concordância;

$\bar{O}$ = média dos valores medidos pelo método padrão ($m^3 m^{-3}$).

Tabela 2. Classificação de desempenho conforme o valor do coeficiente “c”.

Valor de “c”	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

Para comparar o erro na determinação do conteúdo de água no solo foi realizada uma simulação com o objetivo de estimar a lâmina de irrigação pelas equações recomendadas pelos fabricantes dos sensores EC-5, 5TE e Diviner, e pela equação de calibração específica proposta neste estudo. Para tanto, foram considerados como limites superior e inferior de umidade do solo, para o cálculo da lâmina de irrigação, os valores da umidade equivalente à capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade crítica (θ_{cr}), para cada solo. Assim, para o solo de textura franco argilo arenosa a $\theta_{cc} = 0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $\theta_{cr} = 0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ enquanto que, para o solo de textura areia os seguintes valores foram assumidos: $\theta_{cc} = 0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $\theta_{cr} = 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para o cultivo de uma espécie vegetal com profundidade efetiva do sistema radicular de 0,4 m, para ambos os solos (Equação 7).

$$LL = (\theta_{cc} - \theta_{cr}) \times Z \times 1000 \quad (7)$$

Em que,

LL= lâmina líquida (mm)

θ_{cc} : umidade equivalente à capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

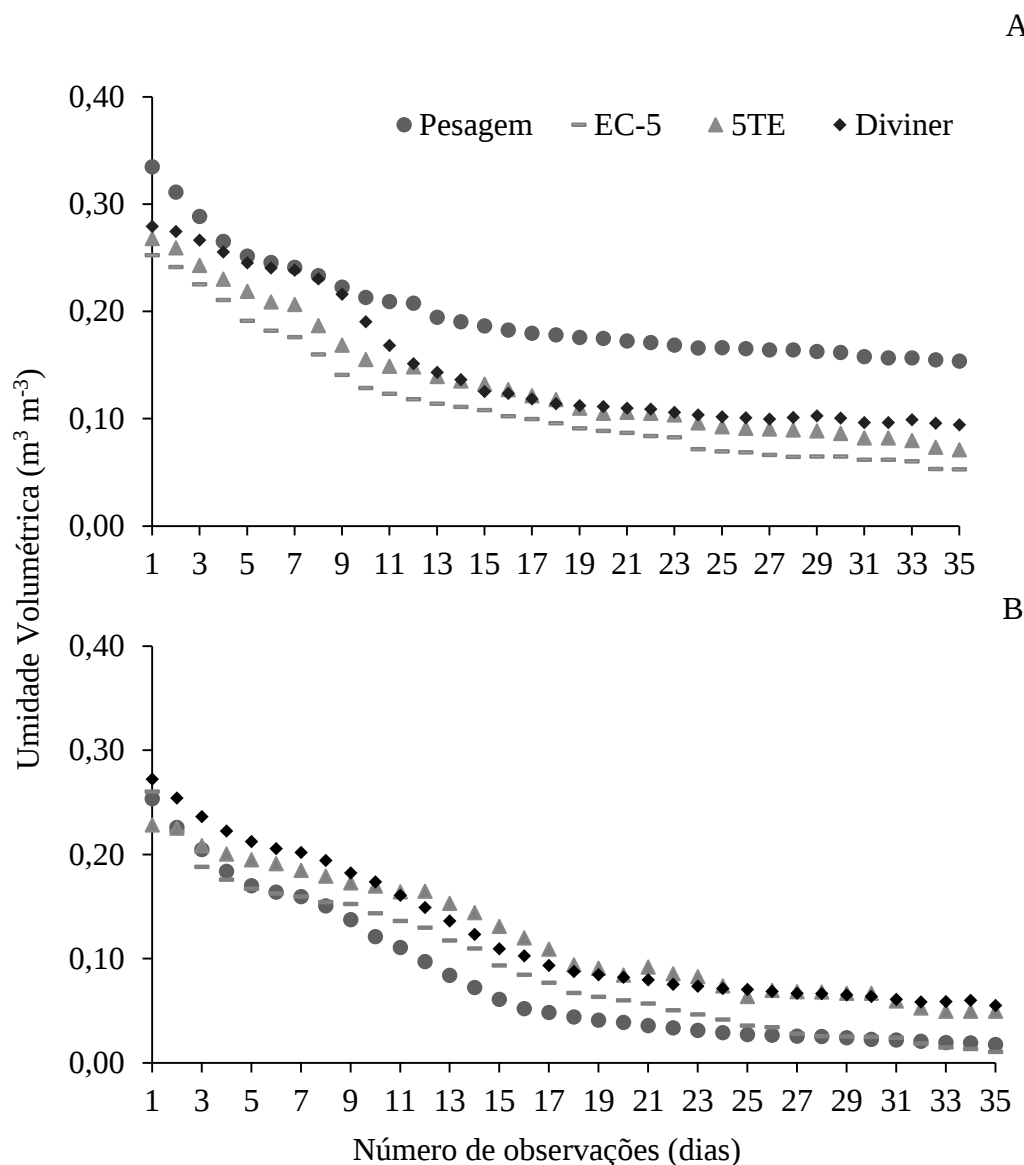
θ_{cr} : umidade crítica estabelecida para a cana-de-açúcar ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

Z: profundidade do sistema radicular (m).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das leituras diárias de umidade volumétrica do solo, via método padrão (pesagem) e leituras realizadas pelos sensores EC-5, 5TE e Diviner, conforme equação recomendada pelos respectivos fabricantes, foram geradas as curvas de secagem (Figura 2). Desse modo, é possível avaliar o conteúdo de água no solo ao longo do tempo, desde o ponto da saturação até não haver variação significativa de umidade do solo entre leituras consecutivas, o que ocorreu em 35 dias.

Figura 2. Curvas de secagem dos solos estudados em função dos valores de umidade estimada pelos sensores EC-5, 5TE e Diviner e a umidade gravimétrica (pesagem) convertida em umidade volumétrica; (A) Solo de textura franco argilo arenosa; (B) Solo de textura areia.



As faixas de leituras de umidade volumétrica estimada pelos sensores EC-5, 5TE e Diviner no solo franco argilo arenosa (Figura 2A), antes de serem calibrados, vão de 0,05 a 0,25 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, 0,07 a 0,27 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e 0,09 a 0,28 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente. Apesar dos valores de umidade volumétrica estimada, antes da calibração, estarem próximos entre si, principalmente comparando o 5TE e a Diviner, do que quando comparados com os valores da umidade volumétrica medida (0,18 a 0,34 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Entretanto, quando se analisou a faixa de leitura da Diviner entre 0,22 a 0,26 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, constatou-se que houve uma aproximação entre estes valores com os da umidade volumétrica medida (padrão). Portanto, pode-se

observar que as equações recomendadas pelos fabricantes subestimaram os valores de umidade do solo de textura franco argilo arenosa.

Em estudos realizados por Souza et al. (2013), utilizando sonda FDR (Diviner 2000), em um Latossolo Vermelho-amarelo de textura média, também foram observadas diferenças entre os valores de umidade volumétrica medidos e estimados pela sonda e, da mesma forma que nesta pesquisa, com a equação do fabricante subestimando a umidade real do solo. Varble e Chavez (2011), também avaliaram o conteúdo de água em solos de textura média, e observaram que os sensores utilizados (CS616, TDT e 5TE), superestimaram os valores da umidade volumétrica, observando que após a calibração dos mesmos, os erros da equação utilizada pelo fabricante foram reduzidos para menos de $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esta contradição deve-se ao fato das leituras dos sensores estarem associadas à granulometria e à estrutura do solo, como constatado por Morgan et al. (1999) e Fares et al. (2004) ao compararem as equações recomendadas pelos fabricantes com a específica para vários tipos de solo, verificaram que houve diferença na estimativa do conteúdo de água no solo.

No solo de classe textural areia, as faixas de leituras de umidade volumétrica estimada pelos sensores EC-5, 5TE e Diviner, conforme equações recomendadas pelos fabricantes, foram de $0,011$ a $0,260 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $0,049$ a $0,228 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,055$ a $0,272 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente (Figura 2B). Os valores de umidade volumétrica estimada pelo sensor EC-5 aproximaram-se da faixa da umidade padrão (medida). Porém, de forma geral, as funções de calibração fornecidas pelos fabricantes dos sensores, superestimaram os valores de umidade do solo.

Os pesquisadores Antunes Júnior et al. (2018), ao trabalharem com o sensor EC-5, em um Latossolo de textura franco argilo arenosa, também observaram que a umidade volumétrica foi superestimada pela calibração fornecida pelo fabricante, principalmente em faixas mais úmidas no solo. Possivelmente, tal fato ocorreu devido a extrapolação da permissividade do sensor, pois afeta a qualidade na estimativa do conteúdo de água refletindo-se, na imprecisão das leituras (DOBSON et al., 1985).

Assim, Lima et al. (2018) e Vaz et al. (2013) afirmam que é preciso realizar a calibração dos sensores de umidade do solo específica para o tipo de solo a ser cultivado, já que as características físico-química do solo interferem na precisão da leitura da umidade do solo pelos sensores eletrônicos, pois influenciam na permissividade dielétrica do solo, e consequentemente afeta a estimativa do conteúdo de água. As equações de calibração específicas propostas neste estudo foram geradas para cada tipo de solo e sensores EC-5,

5TE e Diviner estudados (Tabela 3), por meio da correlação entre a umidade volumétrica medida (padrão) e a estimada pelos sensores.

A seleção da equação de ajuste foi realizada com prioridade as equações lineares (maior facilidade operacional tanto para implementar em programações como cálculos feitos manualmente) e com base no coeficiente de determinação (R^2). Segundo Degenhardt et al. (2002), o R^2 representa a certeza da predição do valor real, e quanto mais alto melhor é a qualidade do ajuste.

Tabela 3. Equações de calibração obtidas nos solos estudados.

Sensores	Equações de calibração	R^2
Solo de textura franco argilo arenosa		
EC-5	$\theta = 0,8144x + 0,1054$	0,98
5TE	$\theta = 0,8083x + 0,0878$	0,97
Diviner	$\theta = 0,7117x + 0,0910$	0,93
Solo de textura areia		
EC5	$\theta = 1,0140x - 0,0126$	0,96
5TE	$\theta = 1,1564x - 0,0596$	0,92
Diviner	$\theta = 1,0348x - 0,0467$	0,99

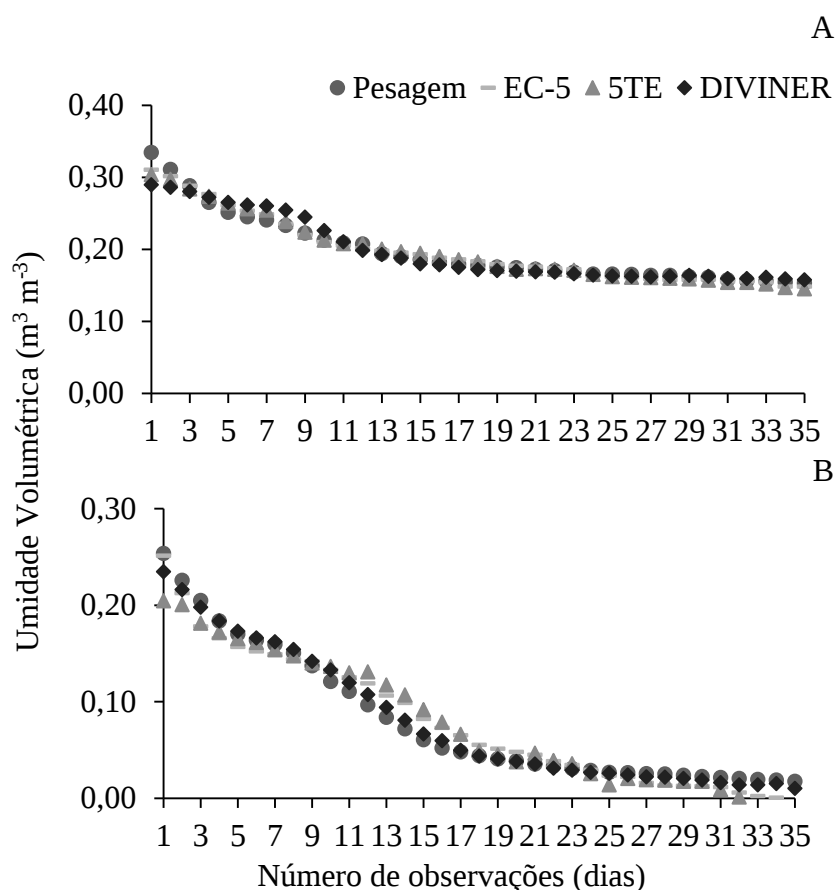
R^2 - coeficiente de determinação; θ - conteúdo volumétrico de água corrigido ($m^3 m^{-3}$); x - conteúdo volumétrico de água estimado pelo sensor conforme equação do fabricante ($m^3 m^{-3}$).

Resultados semelhantes aos constatados na presente pesquisa, em relação ao modelo linear da equação e ao coeficiente de determinação, foram também obtidos por Almeida et al. (2018) quando calibraram o sensor de capacitância EC-5, e alcançado valor de R^2 de 0,98, em Espodossolo Humilúvico de textura arenosa na Zona da Mata de Pernambuco. Wu et al. (2014), ao calibrarem e avaliarem este mesmo sensor, em solos arenosos (> 90% de areia) de dunas do norte da China, obtiveram equação com relação quadrática entre as leituras dos sensores e o conteúdo de água volumétrico do solo estudado, obtendo um coeficiente de determinação de 0,95. Souza et al. (2013), ao estudarem a calibração de Sonda FDR (Diviner 2000) para estimativa da umidade de um Latossolo Vermelho-amarelo, de textura média, e um Nitossolo Vermelho, de textura argilosa, encontraram os valores de coeficiente de determinação de 0,94 e de 0,91, respectivamente, sendo tais resultados similares aos obtidos no presente estudo.

Os valores da umidade volumétrica estimada pelos sensores, para ambos os solos estudados, após a aplicação as respectivas equações de calibração propostas neste estudo, apresentou valores próximos aos reais (Figura 3). No entanto, para os sensores EC-5 e 5TE, no solo de classe textural areia na faixa entre 0,030 e 0,097 $m^3 m^{-3}$, estão mais próximos

após a calibração. As faixas de valores estimados antes da calibração do EC-5 e 5TE era de 0,047 a 0,130 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e de 0,083 a 0,165 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente (Figura 2B), enquanto que após a calibração as faixas foram de 0,047 a 0,119 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e de 0,047 a 0,131 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente (Figura 3B).

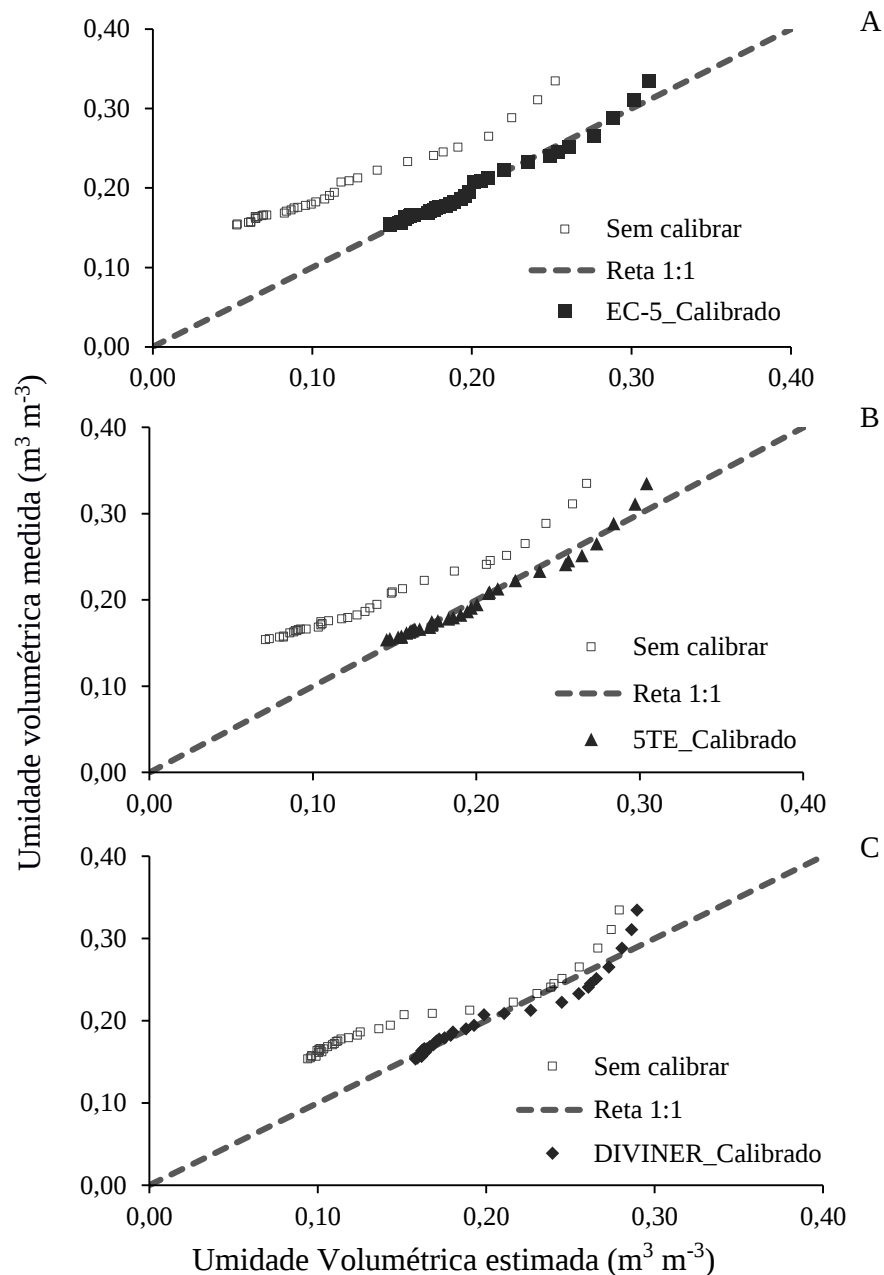
Figura 3. Curvas de secagem do solo, corrigidas com as respectivas equações específicas de calibração de cada sensor; (A) Solo franco argilo arenosa; (B) Solo areia.



Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que os sensores (EC-5, 5TE e Diviner) precisam ser calibrados para serem usados em solos de textura franco argilo arenosa e areia, a fim de se obter valores de umidade volumétrica mais precisos e exatos.

Após a calibração dos sensores, EC-5, 5TE e Diviner, para o solo textura franco argilo arenosa, o conteúdo volumétrico de água corrigido com a equação específica aproximou-se ao valor medido (próximo à reta 1:1) (Figura 4). Para valores de umidade do solo maiores que 0,30 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, mesmo após a calibração, todos os sensores reduziram sua sensibilidade em estimar a umidade do solo, subestimando os valores de umidade volumétrica medidos (Figuras 4A, B e C).

Figura 4. Umidade volumétrica estimada pelos sensores EC-5 (A), 5TE (B) e Diviner (C) antes e depois da calibração e sua correlação com a umidade volumétrica medida para o solo de textura franco argilo arenosa.

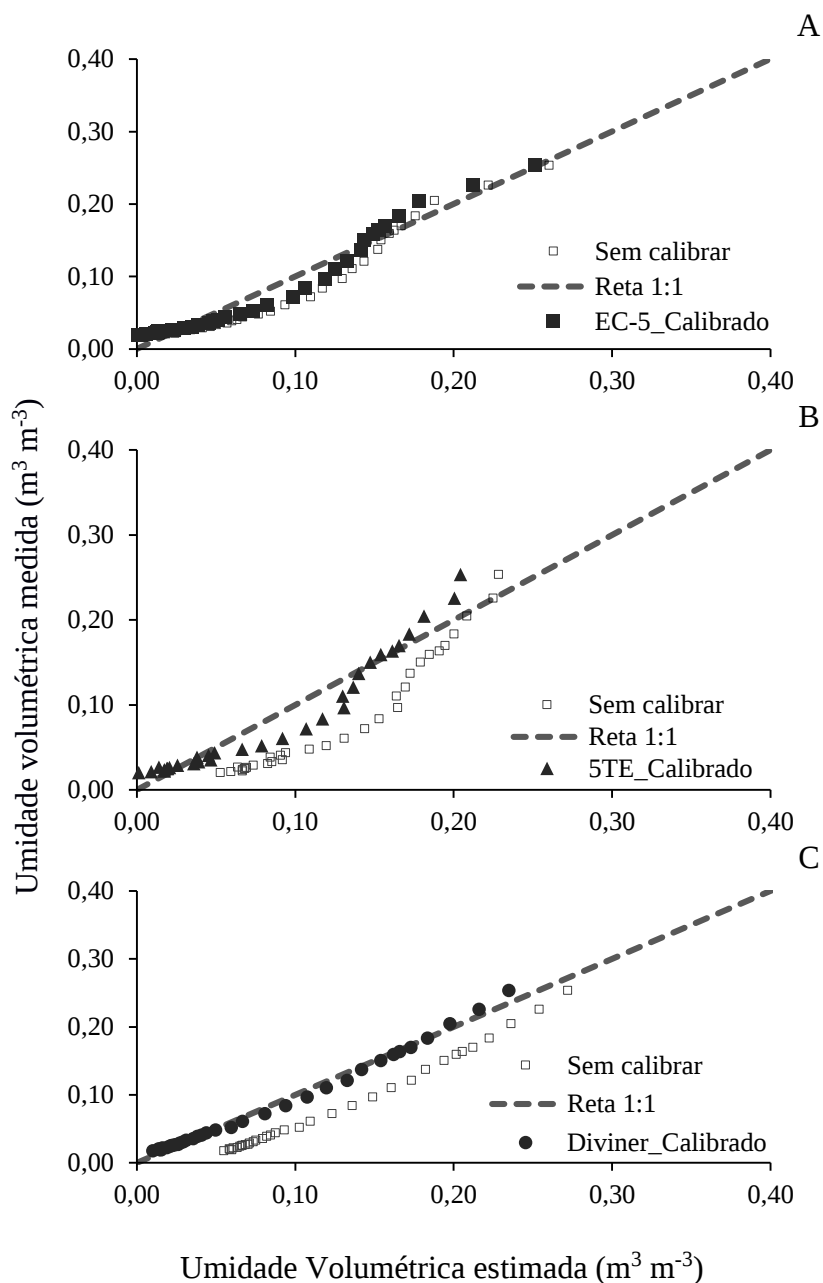


Resultados similares foram obtidos por Jiménez et al. (2019) quando calibraram sensores 5TE, EC-5 e YL-69 para solo de textura franco argilo arenoso e concluíram que, além dos sensores reduzirem a sensibilidade nas faixas mais umidades do solo, também subestimaram os valores de umidade volumétrica real.

No solo de classe textural areia a umidade volumétrica estimada também foi corrigida, por meio das equações de calibração específicas dos sensores Diviner e ECH2O, modelos EC-5 e 5TE; e assim aproximou-se do valor real da umidade do solo (próximo a

reta 1:1), principalmente a Diviner (Figura 5). No entanto, em umidade superior à $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ não seria necessário realizar a calibração para os sensores EC-5 e 5TE, tendo em vista que os dados antes da calibração já se encontram próximos à reta 1:1 (Figuras 5A e B).

Figura 5. Umidade volumétrica estimada pelos sensores EC-5 (A), 5TE (B) e Diviner (C) antes e depois da calibração e sua correlação com a umidade volumétrica medida para solo de classe textural areia.



Com base nos índices estatísticos, pode-se afirmar que a calibração específica melhorou significativamente a exatidão dos sensores EC-5, 5TE e Diviner, para ambos os solos, resultando em valores de RMSE baixos ($\leq 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para todos os sensores, e

classificado como razoável, de acordo com a classificação de Fares et al. (2011). Segundo Batista et al. (2016), quanto menor o valor do RMSE melhor o desempenho do modelo de calibração utilizado. O valor do erro médio (EM) encontrado na presente pesquisa foi zero após a calibração para todos os sensores e solos, expressando a exatidão das equações propostas. Segundo Pequeno et al. (2018) quando o valor do EM for positivo, a tendência é de superestimar, e quando for negativo de subestimar, sendo que, quanto mais próximo de zero for o EM maior será a exatidão do modelo proposto (Tabela 4).

Tabela 4. Índices estatísticos para os sensores EC-5, 5TE e Diviner antes e depois da calibração.

		Sem Calibração					
Solo	Sensores	EM ¹	RMSE ²	r ³	d ⁴	c ⁵	Classificação ⁶
Franco argilo arenosa	EC-5	-0,09	0,09	0,99	0,67	0,66	Bom
	5TE	-0,06	0,06	0,98	0,76	0,74	Bom
	Diviner	-0,05	0,05	0,97	0,82	0,80	Muito Bom
Areia	EC-5	0,02	0,02	0,98	0,98	0,96	Ótimo
	5TE	0,04	0,04	0,88	0,96	0,97	Muito Bom
	Diviner	0,04	0,04	1,00	0,91	0,91	Ótimo
		Calibrado					
Solo	Sensores	EM ¹	RMSE ²	r ³	d ⁴	c ⁵	Classificação ⁶
Franco argilo arenosa	EC-5	0	0,01	0,99	0,99	0,98	Ótimo
	5TE	0	0,01	0,99	0,98	0,97	Ótimo
	Diviner	0	0,01	0,97	0,98	0,95	Ótimo
Areia	EC-5	0	0,01	0,98	0,99	0,97	Ótimo
	5TE	0	0,02	0,96	0,98	0,94	Ótimo
	Diviner	0	0,01	1,00	1,00	1,00	Ótimo

¹Erro médio; ²Raiz quadrada do erro quadrático médio; ³Coefficiente de correlação; ⁴Índice de concordância;

⁵Coefficiente de desempenho; ⁶Classificação de desempenho proposta por Camargo e Sentelhas (1997).

Após a calibração, os valores do índice de concordância (d) para todos os sensores e ambos os solos, foram $\geq 0,98$, indicando ótima concordância entre os valores de umidade volumétrica medida e a estimada pelos sensores. Em estudo realizado por Silva Junior et al. (2013) também foram observados elevados valores de índice de concordância de Wilmort (d), superiores a 0,99, comprovando que a calibração específica de sensores de umidade é essencial para obtenção de conteúdo de água real no solo. Os índices de desempenho (c), segundo Camargo e Sentelhas (1997), foram classificados como ótimos após a calibração, para os sensores EC-5, 5TE e Diviner, pois apresentaram valores $\geq 0,94$, para ambos os solos.

De acordo com os resultados obtidos pode-se inferir que a utilização desses sensores para o monitorar o conteúdo de água no solo e, consequentemente, subsidiar o manejo da

irrigação, sem a equação de calibração específica para os solos estudados, implica na redução da eficiência do uso da água e, conseqüentemente, interfere na decisão sobre o momento e a quantidade de água a ser aplicada no solo. Segundo Freitas et al. (2012), utilizar instrumentos que medem a umidade de solo não calibrados de acordo com o método padrão pode resultar nos aumentos do número de irrigações e do volume de água consumida, comprometendo a eficiência do uso da água. Semelhante aos resultados apresentados no presente estudo, Almeida et al. (2018) verificaram que a calibração do sensor de umidade de solo tipo capacitivo em solo arenoso é fundamental, uma vez que após a calibração o valor RMSE reduziu e o do índice de concordância elevou ($d = 0,98$), configurando assim alta precisão e exatidão da equação de calibração proposta.

Ao estimar a lâmina de irrigação para o solo de textura franco argilo arenosa, utilizado nesta pesquisa, ou seja, com capacidade de campo igual a $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e umidade crítica de $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e ainda, considerando o cultivo de uma cultura com profundidade radicular efetiva de 0,4 m, com base nas leituras do sensor de umidade de solo EC-5 ($0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) não calibrado, seria necessário aplicar uma lâmina de irrigação de 52 mm ($520.000 \text{ L ha}^{-1}$) para alcançar a umidade equivalente à capacidade de campo. Da mesma forma, ao se utilizar o sensor 5TE ($0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) a lâmina de reposição seria de 44 ($440.000 \text{ L ha}^{-1}$) e a Diviner ($0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) de 28 mm ($280.000 \text{ L ha}^{-1}$). Por outro lado, com base nas leituras dos mesmos sensores, quando devidamente calibrados, a lâmina de irrigação seria de apenas 16 mm ($160.000 \text{ L ha}^{-1}$), evidenciando o menor consumo de água por hectare.

No entanto, para a condição do solo areia utilizando a equação dos fabricantes não haveria necessidade de irrigar, pois todos os sensores EC-5, 5TE e Diviner, superestimaram os valores, apresentando leituras acima do valor da capacidade de campo ($0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Sendo que, a umidade real do solo já estava na umidade crítica ($0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), neste caso seria necessário uma lâmina de irrigação de 7,6 mm (76.000 L ha^{-1}) para elevar a umidade do solo para a capacidade de campo. Assim, as leituras dos sensores com as equações dos fabricantes, provavelmente, levariam a perdas irreversíveis da produção agrícola.

A calibração específica de sensores proporciona lâminas de irrigação mais precisas às necessidades hídricas da planta, visto que estes equipamentos fornecem valores de umidade volumétrica do solo, influenciando nos fatores de crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas. Sabe-se que o excesso e/ou déficit de água é prejudicial às plantas, além disso a otimização do uso racional de água é fundamental para a agricultura sustentável. Portanto, é evidente a importância do conhecimento físico-hídrico do solo para

subsidiar a decisão de quando e quanto irrigar, principalmente quando se utilizam sensores de umidade como instrumentos de medição do conteúdo de água no solo (CARVALHO et al., 2011).

Nesse sentido, Gordin et al. (2019) ao avaliar o manejo e eficiência de irrigação para a cultura do pimentão, observou que a utilização de sensores EC-5 proporcionou menores lâminas de irrigação em relação ao tensiômetro, mas não houve diferença significativa nas variáveis de crescimento e produtividade, quando comparou-se os dois métodos de determinação da lâmina de irrigação. Consequentemente, o uso do sensor EC-5 calibrado resultou em maior eficiência de uso de água para a cultura do pimentão. Pinheiro (2019), ao estudar o manejo de irrigação do cafeeiro utilizando os métodos da estufa (padrão), forno elétrico e sensores calibrados para as condições de solo estudadas, constatou que os sensores determinam a umidade do solo de forma precisa em relação ao método padrão, obtendo resultados satisfatórios na produtividade da cultura. Diante disso, a precisão e a eficiência dos sensores em determinar as lâminas de irrigação é fundamental para economia do uso de água.

Nesse sentido, o conhecimento e monitoramento do teor de água no solo quando se dispõe de sensores eletrônicos como EC-5, 5TE e Diviner podem ser usados em propriedades agrícolas irrigadas, para fins de manejo de irrigação, por ser de fácil operacionalidade e elevada precisão em estimar a umidade do solo.

CONCLUSÕES

As curvas de calibração dos fabricantes dos sensores Diviner 2000 e ECH2O (EC-5 e 5TE) não se aplicam para ambos os solos estudados, à exceção para a faixa de umidade entre 0,22 a 0,26 m³ m⁻³, no solo de textura franco argilo arenosa, caso essa faixa seja a única de interesse.

As equações de calibração, propostas nesta pesquisa, melhoraram a exatidão na medição de todos os sensores avaliados e, proporcionaram valores de $R^2 \geq 0,93$ e 0,92, e baixos valores de $RMSE \leq 0,01$ e 0,02 m³ m⁻³ para os solos de texturas franco argilo arenosa e areia, respectivamente.

Os sensores de umidade do solo EC-5, 5TE e Diviner com a equação de calibração específica, proposta neste estudo, para solo de textura franco argilo arenosa reduziram em 69, 63 e 43%, respectivamente, a quantidade de água a ser aplicada quando comparada com

o uso da equação recomendada pelo fabricante. Para o solo de textura areia os sensores não calibrados comprometeria a produção da cultura, pois todos os sensores estudados superestimaram os valores de umidade real do solo, apresentando leituras acima do valor da capacidade de campo.

Para a obtenção de uma maior exatidão dos sensores de umidade recomenda-se que para cada um deles seja gerada a equação de calibração específica para cada tipo de solo a ser estudado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. D. G. C.; SILVA, D. M. O.; ALMEIDA, B. G.; SILVA, Ê. F. F.; BARBOSA, R. N.; SANTOS JÚNIOR, J. A. FDR ECH2O sensor performance in Spodosols. **Dyna**, v. 85, n. 207, p. 60-64, 2018. DOI: 10.15446/dyna.v85n207.71897.

ANTUNES JÚNIOR, E. de J.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo EC-5 em um Latossolo em função da densidade do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 1, p. 80-88, 2018. DOI: 10.13083/reveng.v26i1.864

BATISTA, L. S.; COELHO, E. F.; CARVALHO, F. A. P.; SILVA, M. G.; GOMES FILHO, R. R.; GONÇALVES, A. A. Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 522-532, 2016. DOI: 10.7127/rbai.v10n200388

BAYER, A.; MAHBUB, I., CHAPPELL, M.; RUTER, J.; VAN IERSEL, M. W. Water Use and Growth of *Hibiscus acetosella* ‘Panama Red’ Grown with a Soil Moisture Sensor-controlled Irrigation System. **HortScience**, v. 48, n. 8, p. 980-987, 2013. DOI: 10.21273/HORTSCI.48.8.980

BÖHME, B.; BECKER, M.; DIEKKRÜGER, B. Calibrating a FDR sensor for soil moisture monitoring in a wetland in Central Kenya. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 66, n. 1, p. 101-111, 2013. DOI: 10.1016/j.pce.2013.09.004

BOYER, J. S.; KRAMER, P. J. **Soil and Water**. In: Water relations of plants and soils. San Diego, p.84-114, 1995.

BURNETT, S. E.; VAN IERSEL, M. W. Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* grown with capacitance sensor-controlled irrigation. **HortScience**, v. 43, n. 5, p.1555-1560, 2008. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.5.1555

CAMARGO, A. P., SENTELHAS P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, J. de. A; REZENDE, F. C.; ARQUINO, R. F.; FREITAS, W. A. de; OLIVEIRA, E. C. Análise produtiva e econômica do pimentão-vermelho irrigado com diferentes lâminas, cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 569-574, 2011.

CRUZ, T. M.; TEIXEIRA, A. D. S.; CANAFÍSTULA, F.J.; SANTOS, C.C.D.; OLIVEIRA, A. D.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010.

DEAN, R. N.; RANE. A. K.; BAGINSKI, M. E.; RICHARD, J.; HARTZOG, Z.; ELTON, D. J. A Capacitive fringing field sensor design for moisture measurement based on printed circuit board technology. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 61, n. 4, p. 1005-1112, 2012. DOI: 10.1109/TIM.2011.2173041.

DEGENHARDT, J.; DUCROQUET, J. P.; REIS, M. S. dos; GUERRA, M. P.; NODARI,

R. O. Efeito de anos e determinação do coeficiente de repetibilidade de características de frutos de goiabeira-serrana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1285-1293 2002. DOI: 10.1590/S0100-204X2002000900012

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; HALLIKAINEN, M. T.; EL-RAYES, M. A. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: dielectric mixing models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. GE-23, n. 1, p. 35-46, 1985. DOI: 10.1109 / TGRS.1985.289498

FARES, A.; ABBAS, F.; MARIA, D.; MAIR, A. Improved calibration functions of three capacitance probes for the measurement of soil moisture in tropical soils. **Sensors**, v. 11, n. 5, p. 4858-4874, 2011. DOI: 10.3390/s110504858.

FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; EL-KADI, A. I.; PARSONS, L. R. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. **Vadose Zone Journal**, v. 3, n. 4 p. 1390-1399, 2004. DOI: 10.2136/vzj2004.1390

FREITAS, W. A. de.; CARVALHO, J. de A.; BRAGAI, R. A.; ANDRADE, M. J. B. de. Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16 n. 3, p. 268-274, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000300006

GORDIN, L. C., ALMEIDA, C. D. G. C. de., SANTOS JÚNIOR, J. A., SILVA, E. F. de F., ALMEIDA, A. C. dos. S., SILVA, G. S. N. da. Irrigation scheduling techniques and irrigation frequency on capsicum growth and yield. **DYNA**, v. 86, n. 211, p. 42-48, 2019. DOI: 10.15446/dyna.v86n211.77678

HABERLAND, J.; GÁLVEZ, R.; KREMER, C.; CARTER, C. Laboratory and field calibration of the diviner 2000 probe in two types of soil. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 140, n. 4, p. 1-6, 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000687.

JIMÉNEZ, A. D. L. Á. C.; ALMEIDA, C. D. G. C.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; MORAIS, J. E. F.; ALMEIDA, B. G.; ANDRADE, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 195, n. 1, p. 1-5, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104413.

KANG, S.; VAN IERSEL, M. W.; KIM, J. Plant root growth affects FDR soil moisture sensor calibration. **Scientia Horticulturae**, v. 252, n. 1, p. 208-211, 2019. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.03.050

KINZLI, K.; MANANA, N.; OAD, R. A comparison of laboratory and field calibration of a soil moisture capacitance probe for various soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 138, n. 4, p. 310-321, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000418

LEMONS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. Field calibration of a capacitance probe to estimate the soil moisture in a Yellow Latosol. **Magistra**, v. 25, n. 3,

p. 285-292, 2013.

LIMA, J. G. A.; OLIVEIRA, A. S.; SOUZA, L. S.; SILVA, N. D.; VIANA, P. C. Calibration of a soil moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 10, p. 696-701, 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p696-701

MORGAN, K. T.; PARSONS, L. R.; WHEATON, T. A.; PITTS, D. J.; OBREZA, T. A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 4, p. 987-989, 1999. DOI: 10.1071/SR03051

PEQUENO, P. L. L.; FAGUNDES, F. P.; SANTOS, R. C. dos; SANTINI, C. L. A.; M. A. RAMBO; SCHLINDWEIN, J. A. Uso de funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em um Latossolo no estado de Rondônia. **Revista Eletrônica de Engenharia**, v. 14, n. 2, p. 229-239, 2018. DOI: 10.5216/reec.V14i2.51385

PINHEIRO, A. A. **Manejo da irrigação utilizando umidade do solo e dados climáticos em lavoura de cafeeiro conilon**. 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, 2019.

PRIMO, J. T. A.; SILVA, T. G. F.; SILVA, S. M. S.; MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um Argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, v. 62, n. 1, p. 20-29, 2015. DOI: 10.1590/0034-737X201562010003.

PROVENZANO, G.; RALLO, G.; GHAZOUANI, H. Assessing field and laboratory calibration protocols for the Diviner 2000 probe in a range of soils with different textures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 2, p. 1-12, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000950

REGALADO, C. M.; CARPENA, R. M.; SOCORRO, A. R.; MORENO, J. M. H. Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils. **Geoderma**, v. 117, n. 1, p. 313-330, 2003. DOI: 10.1016/S0016-7061(03)00131-9

ROSENBAUM, U.; HUISMAN, J.A.; WEUTHEN, A.; VERRECKEN, H.; BOGENA, H.R. Sensor-to-sensor variability of the ECH2O EC-5, TE and 5TE sensors in dielectric liquids. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 1, p. 181-186, 2010. DOI: 10.2136/vzj2009.0036

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: EMBRAPA, ed. 5, 2018. 590 p.

SENTEK. **Diviner 2000: user guide version 1.21**. Stepney: Sentek Pty Ltd., 2011.

SILVA JUNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; SCALCO, M. S.; SILVA, B. M.; LIMA, P. T. Calibração de sondas de capacitância para determinação de umidade em Latossolo Vermelho Distroférrico. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 743-755, 2013. DOI: 10.15809/irriga.2013v18n4p743.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, A. B.; MELO, F. B.; COELHO FILHO, M. A. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **Scientia**

Agricola, v. 64, n. 6, p. 636-640, 2007. DOI: 10.1590/S0103-90162007000600012

SINGH, J.; LO, T.; RUDNICKA, D. R.; DORR, T. J.; BURR, C. A.; WERLEA, R.; SHAVER, T. M.; MUNOZ-ARRIOLA, F. Performance assessment of factory and field calibrations for electromagnetic sensors in a loam soil. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 87-98, 2018. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.10.020.

SOUZA, C. F.; CONCHESQUI, M. E. S.; SILVA, M. B. da. Semiautomatic irrigation management in tomato. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 1, p. 118-125, 2019. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep118-125/2019

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B.; VARALLO, A. C. T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013. DOI: 10.15809/irriga.2013v18n4p597.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 1, p. 574-582, 1980. DOI: 10.1029/WR016i003p00574

VARBLE, J. L.; CHÁVEZ, J. L. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. **Agricultural water management**, v. 101, n. 1, p. 93-106, 2011. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.09.007

VAZ, C. M. P.; JONESB, S.; MEDINGC, M.; TULLERC, M. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 2, p. 1-16, 2013. DOI: 10.2136/vzj2012.0160.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213.

WU, B.; HAN, H.; HE, J.; ZHANG, J.; CUI, L.; JIA, Z.; YANG, W. Field-specific calibration and evaluation of ECH2O EC5 sensor for sandy soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 1, p. 70-78, 2014. DOI: 10.2136/sssaj2013.05.0209.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO INICIAL DE MPB DA CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE SOLO E FONTES NITROGENADAS

RESUMO: O manejo adequado da adubação nitrogenada e irrigação proporcionam efeito positivo direto sobre a brotação e perfilhamento da cana-de-açúcar e, conseqüentemente na produtividade da cultura. O presente estudo objetivou avaliar variáveis biométricas de cana-de-açúcar, RB92579, sob uso de diferentes sensores de umidade de solo e fontes nitrogenadas durante seu desenvolvimento vegetativo inicial. O experimento foi conduzido em ambiente protegido, localizado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, campus Recife, entre os meses de dezembro de 2019 a março de 2020. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, sendo três sensores de umidade do solo (EC-5, 5TE e Diviner) e duas fontes nitrogenadas ((NH₄)₂SO₄ e NH₄NO₃), com quatro repetições. No período de condução do experimento avaliou-se: altura da planta (AP), altura do colmo (AC), número de folhas (NF), número de perfilhos (NP), comprimento (CF) e largura da folha +1 (LF). Ao final do experimento foi obtida a massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA); e por fim foi determinada a eficiência do uso da água (EUA). Os dados dos parâmetros mensurados foram submetidos a ANOVA e posteriormente ao teste de Tukey ao nível de 0,05 de probabilidade. As variáveis biométricas analisadas apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos a partir dos 60 dias após o transplântio. As maiores médias do número de perfilhos, altura da planta, número de folhas, comprimento e largura da folha +1 foram obtidas sob o tratamento com fonte nitrogenada de nitrato de amônio e manejo de irrigação conduzido via sensor 5TE. Enquanto que, as menores médias resultaram do tratamento com a mesma fonte nitrogenada mas sob manejo de irrigação via sonda Diviner. Os tratamentos com nitrato de amônio e sensor de umidade de solo 5TE, bem como com sulfato de amônio e sensor EC-5 apresentaram maior eficiência do uso da água para as variáveis de massa seca 0,17 e 0,19 kg m⁻³, respectivamente, e fresca com 0,49 kg m⁻³, para ambos os tratamentos.

Palavras-chave: Mudanças pré-brotadas; Biometria; Sensor de umidade; Eficiência do uso da água; *Saccharum spp.*

INITIAL DEVELOPMENT AT THE SUGARCANE MPB AS A FUNCTION OF SOIL MOISTURE SENSORS AND NITROGENATED SOURCES

ABSTRACT: The suitable management of nitrogen fertilization and irrigation provides a direct effect on the sprouting and tillering of sugarcane, reflecting positively on the productivity of the crop. The present study was developed with the objective of evaluating biometric variables of sugarcane, RB92579, under use of different soil moisture sensors and sources of nitrogen during its initial vegetative development. The experiment was carried out in a protected environment at the Agricultural Engineering Department of the Federal Rural University of Pernambuco, campus Recife, between the months of December 2019 and March 2020. The experimental design used was completely randomized, with three soil moisture sensors (EC-5, 5TE and Diviner) and two sources of nitrogen ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4NO_3). During this period was evaluated: plant height (AP), stem height (AC), number of leaves (NF), number of tillers (NP), length (CF) and width of leaf +1 (LF). At the end of the experiment, the fresh mass shoot (MFPA) and dry mass shoot (MSPA) were obtained; and finally, the water use efficiency (EUA) was determined. The parameters data obtained were submitted to ANOVA and subsequently to the Tukey test at the 0.05 probability level. The biometric variables analyzed showed statistical differences between treatments from 60 days after transplantation. The highest averages of the number of tillers, plant height, number of leaves, length and width leaf +1 were obtained under treatment with a ammonium nitrate as source of nitrogen and irrigation management via 5TE sensor. Whereas, the lowest averages resulted from the treatment with the same source of nitrogen but under irrigation management via Diviner probe. Treatments with ammonium nitrate and soil moisture sensor 5TE, as well with ammonium sulfate and EC-5 sensor, showed greater water use efficiency for the variables of dry mass 0.17 and 0.19 kg m^{-3} , respectively, and fresh with 0.49 kg m^{-3} , for both treatments.

Keywords: Pre-sprouted seedlings; Biometry; Moisture sensor; Efficiency of water use; *Saccharum spp.*

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é considerada uma das mais importantes culturas do agronegócio brasileiro, e excede a produção de grãos como trigo, arroz e milho. O Brasil é o maior produtor mundial de cana com cerca de 642,7 milhões de toneladas processadas na safra 2018/2019, correspondendo ao acréscimo de 3,6% em relação à safra anterior. A região do nordeste brasileiro é terceira região mais produtora do país, com produção prevista em 50 milhões de toneladas na safra 2019/2020, aumento de 12,6% em relação à safra de 2018/2019 (CONAB, 2019).

Em decorrência da importância para a economia nacional, os centros de pesquisas, em melhoramento vegetal no Brasil, veem selecionando variedades resistentes a pragas e doenças, maior eficiência no uso da água e nutrientes e elevadas produtividades (SALVIANO et al., 2017). Portanto, faz-se necessário estudos que proporcionem o conhecimento sobre o manejo nutricional, considerando os impactos que a nutrição mineral pode causar nas variáveis quantitativas e qualitativas da cana-de-açúcar, principalmente no que se refere ao nitrogênio. Além disso, a adubação nitrogenada tem efeito direto na brotação e perfilhamento e, conseqüentemente, na capacidade produtiva da cultura (DELLABIGLIA et al., 2018). De acordo com Gírio et al. (2015), o fornecimento de nitrogênio favorece o crescimento inicial da parte aérea até os 180 dias após o transplântio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, pois aumenta o perfilhamento, a altura da planta, o diâmetro e a produção da matéria seca do colmo.

Reis Jr e Monnerat (2002) verificaram que 97% das lavouras canavieiras de Campos dos Goytacazes (RJ) apresentaram deficiência em nitrogênio (N). Vale et al. (2011) avaliaram o crescimento, a produção de massa de matéria seca, o teor e o acúmulo de nutrientes em cana-de-açúcar em solução nutritiva, submetidas à omissão de macronutrientes e concluíram que, a omissão de N foi o que mais limitou o crescimento das plantas e o perfilhamento. Conseqüentemente, a ausência de N reduziu em 92% a massa seca da parte aérea e das raízes em 83%. Segundo Silveira e Crocomo (1989), a concentração de proteínas e atividade da redutase de nitrato é que promovem o crescimento das plantas. O nitrogênio é, por sua vez, responsável pela estruturação das plantas, pois participa de diversos compostos orgânicos e processos fisiológicos vitais na planta (PRADO et al., 2010), além de ser o macronutriente responsável pela taxa de perfilhamento das culturas (SANTOS JÚNIOR et al., 2005).

Estudos com fertilizantes nitrogenados ressaltam que o aproveitamento do nitrogênio dos fertilizantes, aplicados ao solo, pela cultura da cana-de-açúcar pode variar entre 10 e 50%, dependendo do tipo de solo, manejo da cultura e clima (BITTENCOURT et al., 1986; FRANCO et al., 2011; BOSCHIERO et al., 2018). A ureia, fertilizante tradicionalmente utilizado na cultura da cana-de-açúcar devido ao seu menor custo por unidade de N, apresenta elevadas perdas de nitrogênio, 20 a 40%, por volatilização de amônia (COSTA et al., 2003; VITTI et al., 2007; MARIANO et al., 2012). Com a finalidade de obter maior eficiência no uso dos fertilizantes nitrogenados, e aumentar a produtividade de cana-de-açúcar, outras fontes nitrogenadas vêm sendo avaliadas na cultura, como o sulfato de amônio, nitrato de amônio, nitrato de amônio com cálcio e magnésio dolomítico ou com cálcio e enxofre, cloreto de amônio e fertilizantes organominerais líquidos (VIEIRA-MEGDA et al., 2015; MARIANO et al., 2016).

Segundo Robinson et al. (2011), a cana-de-açúcar tem absorção preferencial pelo amônio, principalmente nos três primeiros meses do período de crescimento da cultura, o que impediria o aproveitamento de elevadas concentrações de nitrato dos solos. Consequentemente, este ânion (nitrato) fica mais vulnerável às perdas por lixiviação, que podem trazer prejuízos ambientais. A assimilação de nitrogênio pela planta, quando absorvido na forma de amônio, exige um gasto energético cinco vezes menor do que quando a planta absorve o N na forma de nitrato, visto que o nitrato precisa ser reduzido a amônio dentro das células, exigindo gasto de energia redutora na forma de NADH ou NADPH (BRITTO; KRONZUCKER, 2013). Dessa forma, o crescimento inicial da cana-de-açúcar pode ser maior quando a planta absorve N na forma de amônio do que na forma de nitrato (VITTI et al., 2007).

No entanto, outros trabalhos revelam que a absorção de amônio em elevadas quantidades causa efeito negativo no crescimento vegetal, devido a toxidez do amônio na planta, provocado pela acidificação da zona radicular (WALCH-LIU et al., 2000), desordens na regulação do pH celular, desacoplamento do transporte de elétrons pela fosforilação (GOYAL; LORENZ; HUFFAKER, 1982), e a competição na absorção com outros cátions, como o potássio (K^+) (TEN HOOPEN et al., 2010). De acordo com Mariano et al. (2015), os fertilizantes amoniacaais estão propícios a nitrificar mais rápido, em solos tropicais. Tal fato, leva ao questionamento sobre a real preferência de absorção e eficiência de uso do amônio para a cana-de-açúcar. Estudo realizado por Pissolato et al. (2019) com o objetivo de avaliar as respostas da cana-de-açúcar à variação da razão amônio:nitrato ($NH_4^+ : NO_3^-$),

teve como resultado que o crescimento das plantas foi prejudicado quando o suprimento de NH_4^+ foi superior a 30% na solução nutritiva.

O fornecimento hídrico é um dos fatores cruciais para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar. A disponibilidade hídrica do solo influencia a produção da mesma, pois a água é considerada fator limitante para o estabelecimento, crescimento, desenvolvimento e fotossíntese (RAMESH, 2000; URIBE et al., 2016). A cana-de-açúcar apesar de ter certa tolerância ao estresse hídrico, responde de forma satisfatória a irrigação (SINGH et al., 2007). Em condições de déficit hídrico, a taxa fotossintética e condutância estomática diminuem significativamente para todas as cultivares, mesmo aquelas tolerantes, como a SP83-2847, CTC15 e menos tolerantes SP86-155 ao déficit hídrico (GRAÇA et al., 2010). O baixo suprimento hídrico durante a fase inicial da cana-de-açúcar compromete a altura da planta, comprimento das folhas, número de perfilhos, biomassa, início do surgimento dos internódios, o que pode resultar em reduções no rendimento de colmos e de açúcar (INMAN-BAMBER, 2004), e no diâmetro de colmos (BENNET et al., 2011).

No entanto, se faz necessário elevar a precisão do manejo da irrigação para otimizar a produção comercial em termos de qualidade e quantidade, especialmente em regiões onde o recurso hídrico é limitado (VARBLE e CHÁVEZ, 2011). A irrigação, neste cenário, é uma importante ferramenta para reduzir os efeitos da escassez hídrica, ou seja, suprir a demanda hídrica da cultura e elevar o potencial produtivo da cana-de-açúcar (URIBE et al., 2016).

Assim, na agricultura irrigada, os sensores eletrônicos estão sendo utilizados como ferramenta de monitoramento do conteúdo de água no solo, em virtude da precisão em determinar a umidade do solo (CRUZ et al., 2010), contribuindo para a aplicação da quantidade de água necessária às plantas no momento correto (BARBOSA et al., 2012). Entre os sensores disponíveis no mercado, as sondas de capacitância têm sido bastante utilizadas para subsidiar o manejo da irrigação, seja em ambiente protegido ou não. Além disso, o acesso remoto aliado ao monitoramento em tempo real da umidade do solo auxiliam a tomada de decisão de irrigar com maior precisão (WIEDENFELD, 2004; DURSUN e OZDEN, 2011).

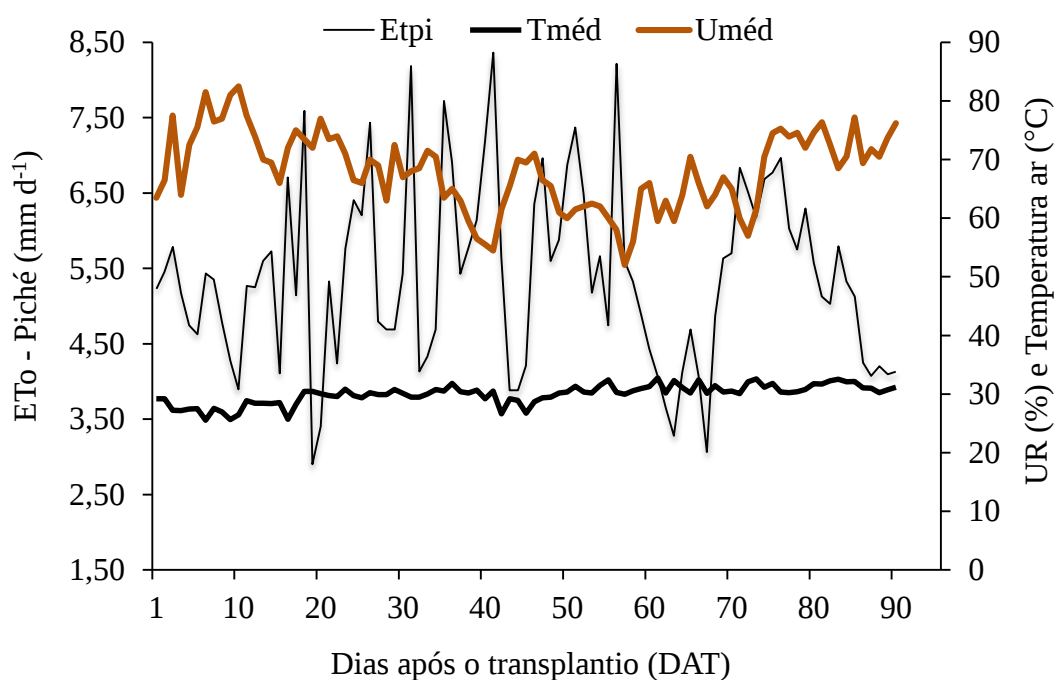
Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar o desempenho de diferentes sensores eletrônicos de umidade de solo, devidamente calibrados para solo classificado em Latossolo Amarelo de classe textural franco argilo arenosa, na determinação automatizada da lâmina de irrigação via gotejamento e seus efeitos nos aspectos morfogênicos da cana-de-açúcar na sua fase inicial de crescimento, sob diferentes fontes nitrogenadas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, na Estação de Fertirrigação e Salinidade, entre os meses de dezembro de 2019 e março de 2020, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife-PE, cujas coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum) são 8° 01' 07" de latitude Sul e 34° 56' 53" de longitude Oeste, altitude de 6,50 m.

As variáveis meteorológicas, temperatura média diária do ar (°C) e a umidade relativa média do ar (%), foram monitoradas por meio de uma estação meteorológica portátil (Digitech modelo XC0348) instalada no interior do ambiente protegido e a evapotranspiração de referência, foi estimada pelo evaporímetro de Piché (VESCOVE; TURCO, 2005; FERNANDES et al., 2011). A temperatura média do ar no período do experimento foi de 30°C e a umidade relativa média do ar de 68% (Figura 6).

Figura 6. Temperatura média diária do ar (°C), umidade relativa média do ar (%) e EToPiché (mm d⁻¹) dentro do ambiente protegido, durante o período experimental.



Os tratamentos consistiram no cultivo de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar RB92579, expostas ao uso de três sensores de umidade de solo, EC-5, 5TE e Diviner, devidamente calibrados para determinar a lâmina de irrigação, bem como ao uso duas fontes

de adubação nitrogenada com combinações de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ e exclusivamente NH_4^+ :nitrato de amônio (NH_4NO_3) e sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). O delineamento experimental utilizado foi inteiramente ao acaso, em esquema fatorial 3×2 , e quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais. O sistema de irrigação localizada foi instalado especificamente para o experimento, onde se utilizou gotejadores autocompensantes com vazão nominal de 2 L h^{-1} (Netafim – modelo PCJ-CNL), para uniformizar distribuição de água no bulbo, sendo distribuído um gotejador por vaso.

O solo utilizado, classificado como Latossolo Amarelo, foi coletado na profundidade 0 – 0,3 m, no município de Goiana-PE ($7^\circ 33' 13''$ de latitude Sul e $35^\circ 00' 34''$ de longitude Oeste, e altitude de 11 m). Para análises físico-hídricas e químicas, foram coletadas amostras deformadas e encaminhadas ao Laboratório Soluções Agrícolas e Integradas (SOLOAGRI). As amostras de solo não deformadas foram coletadas em anéis de volume 100 cm^3 (5 cm de diâmetro x 5 cm de altura) utilizando um amostrador adaptado tipo Uhland. Essas amostras foram utilizadas para determinar a densidade do solo no Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Agronomia da UFRPE. Para a classificação do solo de acordo à textura utilizou-se o triângulo textural do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (LEMOS e SANTOS, 1984) (Tabela 5).

Tabela 5. Características físico-hídricas e químicas do solo utilizado neste estudo.

Classe textural	Análise granulométrica			Ds	MO	CC	PMP	CE
	Areia	Silte	Argila					
	----- g kg ⁻¹ -----							
Franco argilo arenosa	660	100	240	1,54	3,8	0,262	0,166	0,09
pH (água) 1:2,5	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	Na ⁺	K ⁺	H+Al	P	S
	-----cmol _c dm ⁻³ -----					mg dm ⁻³		
	4,6	1,5	0,2	0,55	0,01	0,01	3,93	5,36

Ds = densidade do solo; MO = matéria orgânica do solo; CC = umidade no solo na capacidade de campo; PMP = umidade no solo no ponto de murcha permanente; CE = condutividade elétrica do extrato de saturação; Ca⁺² = cálcio; Mg⁺² = magnésio; Al⁺³ = alumínio; Na⁺ = sódio; K⁺ = potássio; H+Al = acidez potencial; P = fósforo; S = enxofre.

O calcário dolomítico ($\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$) foi aplicado e incorporado ao solo, antes do enchimento dos vasos, 60 dias antes do transplântio das mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar, visando a correção da acidez do solo. A necessidade de calagem foi calculada conforme a equação 1, baseada na recomendação de Cavalcanti et al. (2008).

$$NC = f \times Al \quad (1)$$

Em que:

NC = necessidade de calcário ($t\ ha^{-1}$);

f = fator de correção, considerado 2 (teor de argila 15 a 35%);

Al = alumínio ($cmol_c\ dm^{-3}$).

As mudas da cana-de-açúcar foram produzidas na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), localizada no Município de Carpina/PE, Mata Setentrional, distante da cidade de Recife 56 Km. Após 45 dias do plantio (DAP), as mudas foram transplantadas para vasos de plástico, sendo distribuída uma muda por vaso, com capacidade de 100 litros, com diâmetro superior de 0,46 m e inferior de 0,40 m, os quais foram alinhados com espaçamento de 1,2 m entre fileiras, e entre as plantas o espaçamento foi de 0,5 m.

As unidades experimentais utilizadas foram assentadas sobre uma base plana de alvenaria de 0,20 m de altura, dentro do ambiente protegido. A base dos vasos foi previamente perfurada, a fim de permitir a drenagem do excesso de água, e preenchidos com uma camada de brita nº 3, de 6 cm de espessura, manta geotêxtil (bidim) e, por fim, 110 kg de solo compactados para se obter a densidade média equivalente àquela verificada em condições de campo ($1,54\ g\ cm^{-3}$), calculada por meio da equação 2. O solo utilizado foi seco ao ar, em ambiente ventilado, destorroado e peneirado em malha de 4,75 mm.

$$M_{su} = D_s \times f \times V \quad (2)$$

Em que:

M_{su} - massa de solo úmido (g);

D_s - densidade do solo ($g\ cm^{-3}$);

f - fator de correção (calculado por meio da razão entre terra fina seca ao ar e terra fina seca em estufa);

V - volume útil do vaso (cm^3).

Atrelado a esse processo, foram instalados dois sensores de umidade de solo na profundidade de 10 cm do solo, para cada tratamento, do tipo capacitivo ECH2O, sendo um do modelo EC-5, cujas dimensões são 8,9 cm comprimento, 1,8 cm largura e 0,7 cm de espessura, e outro do modelo 5TE (Decagon Devices, IncTM), cujas dimensões são 10 cm de

comprimento, 3,2 cm de largura e 0,7 cm de espessura. Além disso, foi instalado tubo de acesso de PVC (Sentek Pty Ltda., Austrália), com 56,5 mm de diâmetro externo, 51 mm de diâmetro interno e 50 cm de comprimento, para uso da sonda FDR Diviner 2000® (Sentek Pty Ltda., Austrália).

Transcorridos 60 dias da aplicação de calcário, realizou-se adubação básica de fundação aplicando 100 mg dm⁻³ de K (KCl p.a.), 200 mg dm⁻³ de P ((NH₄)H₂PO₄ p.a.) 50 mg dm⁻³ de N [NH₄NO₃ ou (NH₄)₂SO₄ p.a.], 1,2 mg dm⁻³ de Cu (CuSO₄.5H₂O p.a.), 0,8 mg dm⁻³ de B (H₃BO₃ p.a.), 1,5 mg dm⁻³ de F (FeCl₃.6H₂O p.a.), 3,5 mg dm⁻³ de Mn (MnCl₂.6H₂O p.a.), 0,15 mg dm⁻³ de Mo (NaMoO₄.2H₂O p.a.) e 4 mg dm⁻³ de Zn (ZnSO₄.7H₂O p.a.). Em cobertura, 30 dias após o transplântio, foram aplicados 50 mg dm⁻³ de N [NH₄NO₃ ou (NH₄)₂SO₄ p.a.] e 100 mg dm⁻³ de K (KCl p.a.) (BONFIM et al., 2004).

O solo foi saturado e equilibrado na capacidade de campo, a fim de garantir o melhor pegamento das mudas pré-brotadas. Após o transplântio, iniciou-se a diferenciação dos tratamentos em função da lâmina de irrigação, por meio das leituras dos sensores de umidade do solo (EC-5, 5TE e Diviner). Para elevar a precisão das leituras desses sensores, utilizou-se a equação de calibração específica de cada sensor para o tipo de solo estudado (franco argilo arenosa) (Tabela 6). O manejo de irrigação foi realizado com base na disponibilidade de água no solo, em função da umidade crítica estabelecida para a cana-de-açúcar, 0,214 m³ m⁻³, e as reposições de água foram realizadas para elevar a umidade à capacidade de campo (0,262 m³ m⁻³).

Tabela 6. Equações de calibração obtidas para o solo estudado.

Sensores	Equações de calibração	R ²
EC-5	$\theta = 0,8144x + 0,1054$	0,98
5TE	$\theta = 0,8083x + 0,0878$	0,97
Diviner	$\theta = 0,7117x + 0,091$	0,93

O cálculo do tempo de irrigação foi realizado automaticamente mediante um controlador eletrônico, desenvolvido especificamente para esta pesquisa, comandado por um protótipo de comunicação entre os sensores e válvulas solenóides, de modo a aplicar as lâminas de irrigação de acordo com os tratamentos estabelecidos. A programação implantada na placa eletrônica estabeleceu que as leituras horárias dos sensores eletrônicos fossem corrigidas pelas respectivas equações de calibração (Tabela 6) que, conforme limites de umidade pré-estabelecidos, enviava um sinal para o arduino que acionava a válvula e a bomba d'água, e conseqüentemente o sistema de irrigação. Exceto para a sonda da Diviner,

em que o cálculo foi realizado manualmente, pelas equações 3, 4 e 5, pois a mesma não permite a automação, sendo necessário um operador para obter as leituras da umidade do solo. Portanto, diariamente e em horário fixo (8 h) as leituras com a Diviner eram realizadas e verificada a necessidade ou não da irrigação.

$$LL = (\theta_{cc} - \theta_{Crítica}) \times Z \times 1000 \quad (3)$$

Em que,

LL= lâmina líquida (mm)

θ_{cc} : umidade equivalente à capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$);

$\theta_{Crítica}$: umidade crítica estabelecida para a cana-de-açúcar ($m^3 m^{-3}$);

Z: profundidade do sistema radicular (m).

$$I_a = \frac{\text{Vazão do emissor}}{\text{Área molhada}} \quad (4)$$

Em que:

I_a = intensidade de aplicação dos emissores ($mm h^{-1}$);

Vazão do emissor = $2 L h^{-1}$

Área molhada = $0,17 m^2$.

$$T_i = \frac{LL}{I_a} \quad (5)$$

Em que:

T_i = tempo de irrigação (h)

As variáveis biométricas avaliadas mensalmente, aos 30, 60 e 90 dias após o transplântio, foram: altura da planta (AP) equivalente a distância entre a base da planta no nível do solo até o local de emissão da 1ª folha expandida (+1), ou seja, a primeira folha superior com aurícula visível, com o auxílio de uma trena, precisão de $\pm 0,01$ cm; número de folhas (NF); número de perfilhos (NP); comprimento (CF) e largura da folha +1 (LF) medido com o uso de uma trena, precisão de $\pm 0,01$ cm.

Ao final do experimento, procedeu-se a colheita das plantas, momento em que foi determinado o diâmetro (D) de cada colmo com o auxílio de um paquímetro digital, precisão

$\pm 0,04$ mm, no centro dos entrenós e terço médio da altura da planta, o número de internódios (NI). O material vegetal de cada tratamento foi pesado, referente a massa fresca de parte aérea (MFPA) e, em seguida a massa seca de parte aérea (MSPA) que foi obtida após a secagem do material vegetal à temperatura de 70 °C, até obter peso constante (MARAFON, 2012); e por fim foi determinada a eficiência do uso da água tanto para as variáveis de massa fresca (EUAF) quanto para massa seca (EUAS), a partir da razão entre a massa fresca e seca da parte aérea, respectivamente, e lâmina total de irrigação.

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F e, quando constatado efeito significativo, as médias dos tratamentos foram comparadas mediante o teste de Scott-Knott ao nível de significância de 5% utilizando o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os diferentes sensores de umidade do solo e fontes nitrogenadas testados influenciaram às variáveis de produção da cana-de-açúcar e volume de água aplicado no período experimental (Tabela 7), exceto para o número de perfilhos aos 90 dias. Aos 30 dias os tratamentos nitrato de amônio com sensor 5TE (N_5TE) e com EC-5 (N_EC5), bem como os tratamentos com o sulfato de amônio associado aos sensores 5TE (SA_5TE) e EC-5 (SA_EC5) apresentaram maiores médias entre os tratamentos para as variáveis biométricas avaliadas, sendo que, o N_5TE e SA_5TE obtiveram o mesmo volume de água neste período. Tal tendência não foi observada para as variáveis número de folhas e comprimento da folha +1 das plantas submetidas ao tratamento N_EC5. Nesse sentido, os tratamentos com sulfato de amônio e nitrato de amônio juntamente com a sonda Diviner (SA_DIV e N_DIV, respectivamente) resultaram em menores médias para todas as variáveis mensuradas.

Aos 60 dias as menores médias para as variáveis altura de planta (AP) e comprimento (CF) e largura da folha +1 (LF), foi quando se utilizou o nitrato de amônio com a sonda Diviner (N_DIV). Em relação ao número de perfilhos (NP) e folhas (NF), as menores médias foram obtidas nos tratamentos com nitrato de amônio utilizando tanto o sensor EC-5 (N_EC5) como a Diviner (N_DIV). Resultado semelhante ocorreu aos 90 dias, exceto para a variável número de perfilhos (NP), onde não houve diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 7). Durante o período de condução do experimento não foi observada oscilação considerável de temperatura e umidade do ar, o que colaborou para que não ocorresse variação no crescimento das plantas em resposta à variação climática (Figura 6).

Tabela 7. Variáveis biométricas analisadas e volume de água gasto para o cultivo da cana-de-açúcar RB92579 em função do manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.

Tratamentos	Variáveis biométricas					Volume de água
	NP ¹	AP ²	NF ³	CF ⁴	LF ⁵	L ⁶
30 dias						
SA_EC5	3,75 a	35,38 a	7,00 a	122,25 a	2,90 a	38,40 b
SA_5TE	4,00 a	34,75 a	7,00 a	127,00 a	2,75 a	76,80 a
SA_DIV	2,50 b	29,75 b	6,50 b	101,50 b	2,38 b	19,50 c
N_EC5	4,00 a	32,75 a	6,25 b	115,50 b	3,05 a	19,20 c
N_5TE	4,25 a	36,13 a	7,25 a	131,50 a	2,83 a	—
N_DIV	2,50 b	29,25 b	5,75 b	107,50 b	2,13 b	0,00 d
Pvalor ⁷	0,04	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00
CV (%) ⁸	26,51	8,86	9,58	9,74	10,07	0,83
Média geral	3,50	33,00	6,63	117,54	2,67	38,45
60 dias						
SA_EC5	7,75 a	87,00 a	6,50 a	146,00 a	4,65 a	211,20 b
SA_5TE	6,25 b	88,25 a	6,75 a	151,25 a	4,75 a	211,20 b
SA_DIV	6,75 b	67,00 b	7,00 a	155,50 a	4,03 b	119,37 d
N_EC5	5,00 c	70,00 b	5,75 b	138,25 a	3,88 b	134,40 c
N_5TE	8,25 a	91,63 a	7,50 a	151,25 a	4,53 a	249,60 a
N_DIV	4,00 c	38,88 c	4,75 b	108,50 b	2,93 c	39,98 e
Pvalor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CV (%)	13,42	6,62	12,94	7,38	10,01	0,48
Média geral	6,33	73,79	6,38	141,79	4,13	160,96
90 dias						
SA_EC5	7,50 a	126,00 b	8,25 b	156,00 a	5,20 a	192,00 c
SA_5TE	6,25 a	126,75 b	8,25 b	148,75 a	5,38 a	211,20 b
SA_DIV	6,50 a	96,76 c	8,50 b	165,00 a	4,95 a	105,93 d
N_EC5	6,50 a	75,75 d	6,50 d	144,50 a	4,83 a	76,80 e
N_5TE	8,00 a	141,00 a	9,75 a	153,75 a	5,50 a	307,20 a
N_DIV	4,00 a	47,50 e	6,50 d	117,5 b	3,63 b	19,73 f
Pvalor	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CV (%)	28,21	8,48	9,01	7,85	7,90	0,68
Média geral	6,46	102,29	7,96	147,58	4,92	152,14

¹Número de perfilho; ²Altura da planta (cm); ³Número de folha; ⁴Comprimento da folha +1 (cm); ⁵Largura da folha +1 (cm); ⁶Volume de água utilizado em função das diferentes estratégias de determinação das lâminas de irrigação(mm); ⁷Resultado da análise de variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade; ⁸Coefficiente de variação; SA= sulfato de amônio; N= nitrato de amônio; DIV= Diviner; Letras distintas na coluna, em cada época de avaliação, diferem entre si de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Em relação ao volume de água (L), observou-se que a adubação com nitrato de amônio resultou em maior média quando foi utilizado o sensor 5TE quando comparado a menor média com a sonda Diviner, durante todo o período experimental. No entanto, apenas

aos 30 DAP, o tratamento SA_5TE não diferiu significativamente do N_5TE. O incremento da AP foi de 19; 58 e 66%, quando se compara o volume de água 100; 84 e 94% maior no tratamento N_5TE do que no N_DIV, aos 30; 60 e 90 dias, respectivamente. O crescimento da cana-de-açúcar tem uma relação direta com a quantidade de água disponível para a cultura (SOUZA et al., 2015). Diante disso, evidencia-se que a determinação da lâmina adequada relacionada com o fornecimento adequado de adubação nitrogenada, influencia no crescimento e nas variáveis biométricas da cana-de-açúcar. De acordo com Oliveira et al. (2010), a AP é uma das variáveis morfológicas mais importantes para a identificação da capacidade produtiva da cultura, como também da eficiência do manejo de irrigação adotado.

Pesquisa realizada no Campo Experimental de Bebedouro, pertencente à Embrapa Semiárido, em Petrolina – PE, com as cultivares RB72454 e RB92579, concluiu que a menor lâmina de irrigação (40% da ETc) apresentou a menor altura de planta (AP) para ambas as variedades (OLIVEIRA et al., 2014a). Da mesma forma, aos 60 e 90 DAP o tratamento N_DIV apresentou tanto a menor média em relação à altura da cana-de-açúcar como a menor lâmina de irrigação (Tabela 7). Tal fato reforça a hipótese de Ramesh (2000), quando afirma que o crescimento das plantas de cana-de-açúcar é contínuo até a ocorrência de alguma limitação, como por exemplo, o suprimento hídrico.

Estudo conduzido na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina/PE, avaliou a produtividade de colmos e de açúcar, a eficiência de uso da água e os atributos tecnológicos de cinco variedades de cana-de-açúcar de maturação precoce e seis de maturação média à tardia, submetidas ao regime de sequeiro (1.141,4 mm) e à irrigação plena (1.396,6 mm). Deste estudo, os pesquisadores concluíram que a irrigação influencia na fase inicial de crescimento da cultura, pois a disponibilidade de água nesta fase é fundamental para maior perfilhamento e crescimento do colmo (OLIVEIRA et al., 2011).

Em termos do número de folhas (NF) ocorreu diferença estatística entre os tratamentos durante todo período do experimento (Tabela 7). Os tratamentos com nitrato de amônio e o sensor EC-5 (N_EC5) e com a sonda Diviner (N_DIV), aos 60 e 90 DAP, apresentaram diferenças estatísticas e menor média entre os demais tratamentos estudados, variando entre 4,75 a 6,50. Os valores obtidos no presente estudo permitem inferir que as plantas estavam em boa condição hídrica, mesmo nos tratamentos com menor volume de água aplicado (SA_DIV, N_EC5 e N_DIV). Segundo Silva et al. (2015), o número de folhas para plantas irrigadas durante a fase inicial de desenvolvimento é em torno de 4 a 8 folhas

considerando a reposição hídrica de 100% de umidade do solo na capacidade de campo. Portanto, o número de folhas pode ser usado como um indicador de déficit hídrico (INMAN-BAMBER, 2004). A redução da disponibilidade de água é diretamente proporcional a diminuição da superfície transpirante e o gasto metabólico para a manutenção dos tecidos, ou seja, maior senescência e paralisação do surgimento de folhas (SMIT e SINGELS, 2006; INMAN-BAMBER et al., 2008).

O comprimento da folha (CF) diferiu estatisticamente entre os tratamentos aplicados em todo período de avaliação do experimento, sendo que aos 60 e 90 dias, o tratamento N_DIV apresentou as menores médias, cujos valores obtidos foram 108,5 e 117,5 cm, respectivamente (Tabela 7). Os tratamentos sulfato de amônio e nitrato de amônio com a sonda Diviner, nesse mesmo período, obtiveram diferenças na demanda da quantidade de água, apesar de estarem utilizando o mesmo sensor de umidade de solo. Neste caso, houve um incremento no comprimento da folha entre o tratamento SA_DIV em relação ao N_DIV de 32,1 e 23,5 %, nos respectivos períodos de 60 e 90 dias após o transplântio. De acordo com Inman-Bamber (2004), o comprimento da folha é sensível aos indicadores do suprimento de água para o cultivo de cana-de-açúcar e aos métodos de irrigação adotado na lavoura.

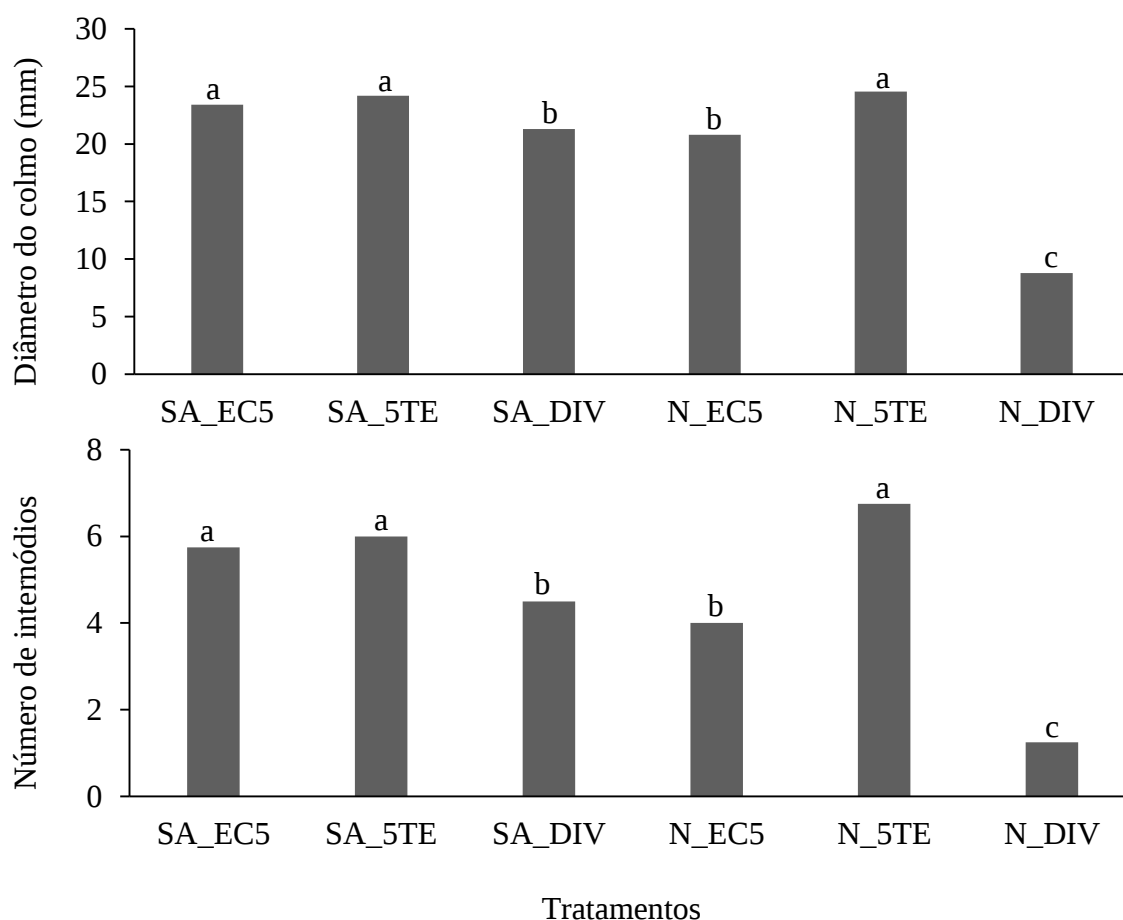
Para a variável largura da folha (LF) houve diferença significativa entre os tratamentos em todo o período de avaliação do experimento, com menores médias para os tratamentos SA_DIV e N_DIV, 2,68 e 2,13 cm, respectivamente, aos 30 dias após o transplântio. Aos 60 e 90 DAP apenas o tratamento N_DIV resultou nas menores médias 2,93 e 3,63 cm, respectivamente (Tabela 7). Holanda et al. (2014) avaliaram o desempenho de quatro cultivares de cana-de-açúcar (RB855453, RB92579, RB965902 e RB965917) durante o desenvolvimento inicial sob condições de deficiência hídrica por meio de variáveis biométricas. De acordo com esta pesquisa a diferença de largura da folha entre os tratamentos com e sem estresse hídrico aos 63 dias após o transplântio foi de 0,5 cm, redução de 10,45%. Segundo Megda et al. (2012), o desenvolvimento das folhas é importante para a produtividade da cultura por determinar a área de interceptação da radiação solar, influenciando no processo fotossintético e, conseqüentemente, no crescimento e morfogênese da cultura.

Em relação a lâmina aplicada (L), observou-se diferença significativa entre os tratamentos aplicados aos 30, 60 e 90 dias após o transplântio (Tabela 7). O nitrato de amônio com a sonda Diviner (N_DIV) foi o tratamento que resultou em menores lâminas de

irrigação, inclusive sem necessidade de irrigação até os 30 DAT. Aos 60 e 90 DAT este mesmo tratamento demandou apenas 16 e 6%, respectivamente, do volume de água aplicado no tratamento N_5TE que, por sua vez, apresentou o maior volume de água aplicado em todo o período avaliado. De acordo com os resultados do presente estudo, fica evidente o efeito do incremento das lâminas de irrigação nas variáveis biométricas avaliadas na cultura da cana-de-açúcar.

O diâmetro do colmo e o número de internódios foram influenciados significativamente pelos tratamentos, destacando SA_EC5, SA_5TE e N_5TE que obtiveram os maiores valores destas variáveis (Figura 7).

Figura 7. Diâmetro de colmo e número de internódios da cana-de-açúcar em função do manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.



Letras distintas nas barras diferem entre si de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

O diâmetro de colmos é dependente de características ligadas ao suprimento hídrico, como também a variedade e adubação, e tem relação direta com a produtividade (SILVA et

al., 2008; CARVALHO et al., 2011). Benet et al. (2011) avaliaram o efeito de doses e fontes de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar e verificaram que o maior diâmetro do colmo e número de internódios foram obtidos com a adubação sulfatada em comparação ao nitrato de amônio. Segundo Penatti (2013), na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar, a cultura tem propensão a absorver maior quantidade de amônio do que nitrato, por não gastar energia para assimilar o nitrogênio e incorporá-lo à sua estrutura. No entanto, pesquisadores advertem que o crescimento em diâmetro do colmo é, também, consequência das lâminas de irrigação aplicadas, visto que o suprimento hídrico tem papel fundamental na elongação dos internódios e na espessura, o que resulta em plantas com maiores diâmetros (SILVA et al., 2014).

De acordo com Boschiero (2017), o fornecimento de nitrato e/ou amônio não alterou o diâmetro do colmo e número de internódios, para a variedade CTC15 cultivada em casa de vegetação, com 163 dias, porém influenciou na altura das plantas e na relação entre a produção biomassa seca de raiz pela produção de biomassa seca da parte aérea. Este fato deve-se ao fornecimento exclusivo de amônio que promoveu menor produção de biomassa seca de folha, colmo, parte aérea total e raízes, comparado ao fornecimento exclusivo de nitrato ou com combinações de nitrato/amônio.

Experimento com cana-de-açúcar instalado em condições de campo na área experimental do IFGoiano, Campus Rio Verde/GO, utilizou tensiômetro, com sensibilidade de 0,1 kPa, para o manejo de irrigação, mantendo o solo na capacidade de campo durante todo o ciclo da cultura. Com 90 dias após o plantio constatou-se que as variáveis comprimento de folha, diâmetro do colmo, altura da planta e número de folha foram de 120 cm, 20 mm, 50 cm e 8 respectivamente (SILVA et al., 2014). Esses valores foram mais baixos do que os apresentados neste estudo, exceto para o tratamento N_DIV em relação a todas as variáveis citadas e N_EC5 para o número de folha. Diante disso, os resultados encontrados na presente pesquisa, de forma geral, evidenciam que o manejo de irrigação com sensores de umidade de solo pode ser utilizado na condução do cultivo de cana-de-açúcar sem prejuízos no desenvolvimento da cultura.

Para a massa fresca e seca de parte aérea da cana-de-açúcar houve diferença entre as médias obtidas para os tratamentos estudados (Tabela 8). Estes resultados evidenciam a relação entre o volume de água e o peso da massa tanto fresca como a seca, ou seja, a eficiência do uso da água.

Tabela 8. Massa fresca de parte aérea (MFPA), Massa seca de parte aérea (MSPA) e Total de água aplicada (TA), da cana-de-açúcar submetida ao manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.

Tratamentos	MFPA (g)	MSPA (g)	TA (mm)
SA_EC5	2168,00 b	849,00 b	441,60 c
SA_5TE	1822,50 c	511,50 c	480,00 b
SA_DIV	1065,50 d	334,00 d	244,80 d
N_EC5	939,00 d	247,50 d	230,40 e
N_5TE	3019,50 a	1.067,50 a	614,4 a
N_DIV	199,00 e	53,50 e	59,70 f
CV (%)	9,29	31,41	0,59
Média geral	1535,58	510,50	345,15

Letras distintas na coluna diferem entre si de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

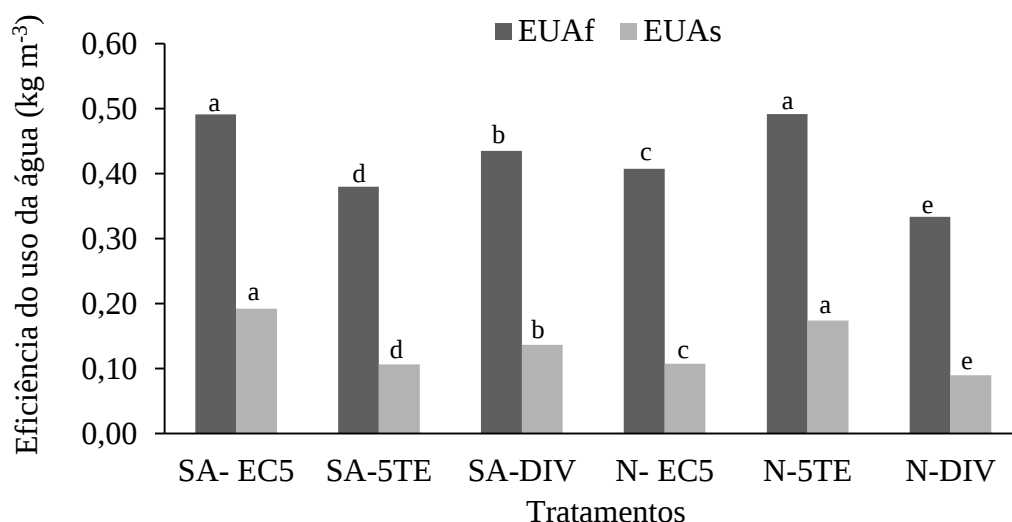
O maior valor de massa fresca e seca da parte aérea (MFPA e MSPA) e o volume de água (TA) aplicado foi do tratamento N_5TE, enquanto N_DIV apresentou as menores médias dessas variáveis (Tabela 8). Os tratamentos SA_EC5 e SA_5TE diferiam estatisticamente em todas as três variáveis analisadas. No entanto, comparando-se os dois tratamentos, verifica-se que a cana-de-açúcar cultivada no tratamento SA_EC5 demandou menor quantidade de água, apesar de apresentar valores médios de massa fresca e seca maior do que o SA_5TE. Resultado inferior ao encontrado por Aleman e Sousa (2015), em ambiente protegido com duração do experimento de 2,5 meses, e objetivo de avaliar parâmetros morfogênicos da cana-de-açúcar RB867515 irrigada durante o desenvolvimento inicial. O maior valor encontrado, por estes pesquisadores, de massa seca da parte aérea foi de 6,32 g quando utilizou 150% da evapotranspiração da cultura (ETc).

Oliveira et al. (2010) observaram que a variedade RB92579 apresentou a maior produção de matéria seca sob irrigação plena, em relação as outras variedades SP79-1011, RB813804, RB863129, RB872552, RB943365, RB72454, RB763710, SP78-4764 e RB867515. Segundo Inman-Bamber e Smith (2005), a suscetibilidade da cana-de-açúcar à deficiência hídrica é maior quando as plantas estão na fase inicial de alongamento dos colmos, a partir dos 60 dias, causando prejuízos na produção de massa seca.

As maiores médias em termos das variáveis de matéria fresca e seca da parte aérea (Tabela 8) foram dos tratamentos N_5TE e SA_EC5, os quais apresentaram maior eficiência do uso da água (Figura 8). A EUA para cana-de-açúcar está intimamente relacionada a fatores fisiológicos e morfológicos como índice de área foliar, alongação dos colmos e matéria seca (GAVA et al., 2001). De acordo com Oliveira et al. (2014b), a lâmina de irrigação quando manejada de forma racional e adequada, aumenta a eficiência do uso da água.

Similarmente às variáveis de matéria fresca e seca da parte área, os tratamentos SA_EC5 e N_5TE apresentaram maior eficiência do uso da água para a variável de massa fresca (EUAF) 0,49 kg m⁻³, em ambos os tratamentos, e em relação a massa seca (EUAs) 0,19 e 0,17 kg m⁻³, respectivamente, indicando os arranjos experimentais que promoveram maior produção de matéria fresca e seca com menor quantidade de água (Figura 8). Os resultados nas variáveis morfogênicas avaliadas (Tabela 7) confirmam essa observação, pois foram os dois tratamentos em que as plantas mais se desenvolveram durante o período do experimento. Resultado inferior a este foi encontrado pelos pesquisadores Aleman e Sousa (2015), ao avaliarem a relação entre massa seca e lâmina de irrigação aplicada, concluindo que a reposição de 50% da ETc resultou na maior eficiência do uso da água (0,10 kg m⁻³), e que o aumento gradual da ETc reduziu a EUA.

Figura 8. Eficiência do uso da água para as variáveis de massa fresca (EUAF) e massa seca (EUAs) para cana-de-açúcar submetidas ao manejo de irrigação via sensores de solo e fontes nitrogenadas.



Letras distintas no grupo de barras de mesma cor diferem entre si de acordo com o teste Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Os tratamentos com maior eficiência (N_5TE e SA_EC5) proporcionaram incremento de EUAF de 33% em relação ao que resultou em menor EUAF (N_DIV). Esse resultado é decorrente, provavelmente, da precisão e exatidão dos sensores de umidade ECH2O, modelos EC-5 e 5TE, em estimar o teor de água para solos com esse tipo de classe textural franco argilo arenosa. As equações de calibração específicas utilizadas para os sensores EC-5, 5TE e Diviner apresentaram R² 0,98, 0,97 e 0,93, respectivamente. De acordo com Degenhardt et al. (2002), o R² representa a certeza da predição do valor real, e quanto

mais alto é o seu valor melhor é a qualidade do ajuste dos dados. Gordin et al. (2019), ao avaliar o manejo e eficiência de irrigação via solo e clima para a cultura do pimentão, observou que o uso do sensor EC-5 calibrado resultou em maior eficiência de uso de água para a cultura, em relação à utilização do tensiômetro, como também ao minilísímetro de pesagem, equação de Hargreaves-Samani e evaporímetro de Piché.

De acordo com Souza et al. (2016), resultados de calibrações locais com sensores do tipo capacitivos melhoram a precisão na estimativa do conteúdo de água do solo, o que indica que a técnica fornece leituras confiáveis e rápidas. No entanto, o uso de sensores de umidade do solo ainda precisa se popularizar e de ajustes na técnica para as condições de campo no Brasil, para auxiliar no manejo adequado de irrigação. A maioria dos produtores rurais brasileiros irriga suas plantações periodicamente, de maneira manual ou semiautomática, e a inspeção da irrigação é visual, comprometendo assim a produtividade, e consequentemente o lucro do produtor.

Ferreira et al. (2016) montaram um sistema de controle e automação de irrigação em ambiente protegido, localizado na sede da Universidade Federal Rural da Amazônia, com o objetivo de racionalizar o uso da água. O sensor de umidade de solo utilizado foi essencial para o acionamento da irrigação de modo a elevar o teor de água do solo até a faixa equivalente a 70 % da capacidade de campo. Gomes et al. (2017) avaliando em ambiente protegido a funcionalidade do sensor SMRT-Y (Rain Bird) comparado ao tensiômetro, ambos instalados em uma área cultivada com feijão sob deficiência hídrica e uso de diferentes qualidades de águas, concluíram que o sensor apresentou confiabilidade para as medidas de umidade do solo; ou seja, viabilidade no monitoramento e controle do teor de água do solo, auxiliando no manejo de irrigação.

Diante disso, pode-se inferir que o uso da irrigação associada à tecnologia dos sensores de umidade do solo aumenta a eficiência da produção de cana-de-açúcar e reduz o desperdício de água e insumos, em virtude da precisão e eficiência dos sensores em determinar as lâminas de reposição. Além disso, a adubação nitrogenada é um dos principais tratamentos culturais responsáveis pelo acréscimo de produtividade e elevação do custo de produção para cana-de-açúcar. A escolha correta da fonte nitrogenada é fundamental para diminuir os índices de perdas por volatilização, principalmente quando aplicado em superfície, como também por lixiviação em solos mais arenosos e reduzir sua acidificação. Portanto, identificar a relação ideal entre nitrato e amônio que favoreça o crescimento da

cultura, eleve a eficiência de uso do fertilizante e nutriente, reduza a acidificação do solo, é possibilitar o manejo sustentável para a produção agrícola.

CONCLUSÕES

O manejo de irrigação via sensor de umidade do solo 5TE associado à adubação com nitrato de amônio resultou nos melhores índices de massa fresca e seca da parte aérea da fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar, variedade RB92579, cultivada em solo franco argilo arenoso.

As variáveis biométricas analisadas apresentaram diferenças estatísticas em função dos diferentes sensores de umidade de solo e fontes de adubação ao longo dos 90 dias de monitoramento.

A adubação com nitrato de amônio juntamente com o uso da sonda Diviner para monitoramento da umidade, resultou em menores valores nas variáveis altura de planta, comprimento e largura da folha +1 aos 60 e 90 dias após o transplântio, como também no diâmetro, número de internódios, massa fresca e seca da parte aérea, não se mostrando adequados para condições similares à deste estudo.

O monitoramento da umidade do solo com o uso da sonda Diviner e adubação com nitrato de amônio proporcionou menor demanda por lâminas de irrigação durante os 90 dias de experimento.

A maior eficiência do uso da água com base na matéria fresca e seca da parte aérea da cana-de-açúcar, variedade RB92579, cultivada em solo franco argilo arenoso até os 90 dias, foi obtida com os tratamentos sob uso do sensor EC-5 e adubação com sulfato de amônio e do sensor 5TE associado à adubação com nitrato de amônio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEMAN, C. C.; SOUSA, D. Aspectos morfogênicos no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar RB 867515 irrigada. *Colloquium Agrariae*, v. 11, n. 2, p. 12-18, 2015. DOI: 10.5747/ca.2015.v11.n2.a121

BARBOSA, M. A. G. B.; FIQUEREDO, V. B.; MEDEIROS, J. F.; NASCIMENTO, I. B. CARVALHO, B. L.; PALÁCIO, V. C. **Calibração de sensor FDR ECH2O para determinação da umidade em dois tipos de solos**. IV INOVAGRI International Meeting, p. 1-5, 2012.

BENNETT, C. G. S.; BUZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. de P.; MAESTRELO, P. R. Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 5, p. 1661-1667, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000500020.

BITTENCOURT, V. C.; FAGANELLO, B. F.; SALATA, J. C. **Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (planta)**. STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos, v. 5, n. 1, p. 26-33, 1986.

BONFIM, E. M. S.; FREIRE, F. J.; SANTOS, M. V. F.; SILVA, T. J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Níveis críticos de fósforo para *Brachiaria brizantha* e suas relações com características físicas e químicas em solos de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 281-288, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000200006

BOSCHIERO, B. N. **Adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar: influência do uso em longo prazo de fontes e/ou doses de nitrogênio**. 2017. 234 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O. “Preferential” ammonium uptake by sugarcane does not increase the ¹⁵N recovery of fertilizer sources. *Plant Soil*, v. 429, n. 1, p. 253-269, 2018. DOI: 10.1007/s11104-018-3672-z

BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. Ecological significance and complexity of N-sources preference in plants. *Annals of Botany*, v. 112, n. 6, p. 957-963, 2013. DOI: 10.1093/aob/mct157

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JUNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: segunda aproximação**. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco, IPA, p. 137, 2008.

CARVALHO, L. A.; SILVA JUNIOR, C. A.; NUNES, W. A. G. A.; MEURER, I.; SOUZA JÚNIOR, W. S. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no centro-oeste do Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 34, n. 1, p. 199-211, 2011.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v. 6 - Safra

2019/2020, n. 3 - Terceiro levantamento, Companhia Nacional de Abastecimento, Brasília, 2019.

COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhidas sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 631-637, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000400007

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C., OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010. DOI: 10.1590/S0100-69162010000100004

DEGENHARDT, J.; DUCROQUET, J. P.; REIS, M. S. dos; GUERRA, M. P.; NODARI, R. O. Efeito de anos e determinação do coeficiente de repetibilidade de características de frutos de goiabeira-serrana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1285-1293 2002. DOI: 10.1590/S0100-204X2002000900012

DELLABIGLIA, W. J.; GAVA, G. J. C.; ARLANCH, A. B.; VILLAS BOAS, R. L.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. Produtividade de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N e inoculadas com bactérias diazotróficas. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2018. DOI: 10.15809/irriga.2018v1n1p28-41

DURSUN, M.; OZDEN, S. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. **Scientific Research and Essays**. v. 6, n. 7, p. 1573-1582, 2011.

FERNANDES, A. L.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; TAKAY, B. Y. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 270-276, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000300008.

FERREIRA, B. O.; OKABE, A. M. dos S.; SILVA, A. J. C. da; ALMEIDA, J. F. S. de; CHASE, O. A. **Irrigação automatizada com plataforma arduino em casa de vegetação na Universidade Federal Rural da Amazônia**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, Foz do Iguaçu/PR, p. 1-5, 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogênio na cana-de-açúcar derivado de fertilizantes nas condições de campo brasileiras. **Field Crops Researc**, v. 121, n. 1, p. 29-41, 2011. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.11.011

GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; PENATTI, C. P. Crescimento e acúmulo de N em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 11, p. 1347-1354. 2001. DOI: 10.1590/S0100-204X2001001100004

GÍRIO, L. A. da S.; DIAS, F. L. F.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S.; SCHULTZ, N.; BOLONHEZI, D.; MUTTON, M. A. Bactérias promotoras de crescimento e adubação nitrogenada no crescimento inicial de cana-de-açúcar proveniente de mudas pré brotadas.

Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 1, p. 33-43, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000100004.

GOMES, E. R.; COSCOLIN, R. B. dos S.; LIMA, J. de; ZUÑIGA, E. A.; MACHUCA, L. M. R.; BROETTO, F. Utilização de sensor e tensiômetro no monitoramento da umidade do solo na cultura do feijoeiro sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 7, p. 2076-2083, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n700710

GORDIN, L. C., ALMEIDA, C. D. G. C. de., SANTOS JÚNIOR, J. A., SILVA, E. F. de F., ALMEIDA, A. C. dos S., SILVA, G. S. N. da. Irrigation scheduling techniques and irrigation frequency on capsicum growth and yield. **DYNA**, v. 86, n. 211, p. 42-48, 2019. DOI: 10.15446/dyna.v86n211.77678

GOYAL, S. S.; LORENZ, O. A.; HUFFAKER, R. C. Inhibitory effects of ammoniacal nitrogen on growth radish plants. I. Characterization of toxic effects of NH_4^+ on growth and its alleviation by NO_3^- . **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 107, n. 1, p. 125-129, 1982.

GRAÇA, J. P; RODRIGUES, F. A.; FARIAS, J. R. B.; OLIVEIRA, M. C. N. de; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; ZINGARETTI, S. M. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 22, n. 3, p. 189-197, 2010. DOI: 10.1590/S1677-04202010000300006

HOLANDA, L. A. de.; SANTOS, C. M.; SAMPAIO NETO, G. D.; SOUSA, A. de. P.; SILVA, M. de. A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Irriga**, v. 19, n. 4, p. 573-584, 2014.
INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, n. 1, p. 107-122, 2004. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.01.018

INMAN-BAMBER, N. G.; BONNETT, G. D.; SPILLMAN, M. F.; HEWITT, M. L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 59, n. 1, p. 13- 26, 2008. DOI: 10.1071/AR07167

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2, p. 185-202, 2005. DOI: 10.1016/j.fcr.2005.01.023

LEMONS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 31p.

MARIANO, E.; LEITE, J. M.; MEGDA, M. X. V.; TORRES-DORANTE, L.; TRIVELIN, P. C. O. Influence of nitrogen form supply on soil mineral nitrogen dynamics, nitrogen uptake, and productivity of sugarcane. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 641- 650, 2015. DOI: 10.2134/agronj14.0422

MARIANO; E.; LEITE, J. M.; VIEIRA-MEGDA, M. X.; CIAMPITTI, I. A.; VITTI, A. C.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Biomass and nutrient content as

sugarcane as affected by fertilizer nitrogen sources. **Crop Science**, v. 56, n. 3, p. 1234-1244, 2016. DOI: 10.2135/cropsci2015.06.0349

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; VIEIRA, M. X.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 411-419, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000200010

MEGDA, M. X. V.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C. Eficiência agrônômica de adubos nitrogenados em soqueira de cana-de-açúcar colhida sem queima. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 47, n. 12, p. 1681-1690, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012001200002.

OLIVEIRA, A. R. de; BRAGA, M. B.; SANTOS, B. L. S. Produção de biomassa de cana-de-açúcar no vale do São Francisco. **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 1, p. 27-38, 2014a. DOI: 10.17224/EnergAgric.2014v29n1p27-38

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C.; SIMÕES NETO, D. E.; ROCHA, A.T.; CARVALHO, L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 6, p. 617-625, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011000600007

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; LIRA JUNIOR, M. A.; MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000900007

OLIVEIRA, F. M. O.; AGUILAR, P. B.; TEIXEIRA, M. F. F.; ASPIAZÚ, I.; MONÇÃO, F. P.; ANTUNES, A. P. S. Características agrotecnológicas de cana-de-açúcar em diferentes épocas de supressão de irrigação e níveis de adubação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 3, p. 1587-1606, 2014b. DOI: 10.5433/1679-0359.2014v35n3p1587

PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar - 30 anos de experiência**. Editora Ottoni, ed. 1, Itu/SP, 347 p., 2013.

PISSOLATO, M. D.; SILVEIRA, N. M.; MACHADO, E. C.; ZAMBROSI, F. C. B.; SODEK, L.; RIBEIRO, R. V. Photosynthesis and biomass accumulation in young sugarcane plants grown under increasing ammonium supply in nutrient solution. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 31, n. 1, p. 401-411, 2019. DOI: 10.1007/s40626-019-00154-w

PRADO, R. M.; FRANCO, C. F.; PUGA, A. P. Deficiências de macronutrientes em plantas de soja cv. BRSMG 68 (Vencedora) cultivada em solução nutritiva. **Comunicata Scientiae**, v. 1, n. 2, p. 114-119, 2010.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, n. 2, p. 83-89, 2000. DOI: 10.1046/j.1439-037x.2000.00404.x

REIS JR., R. A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em campos dos Goyatacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 367-372, 2002. DOI: 10.1590/S0100-06832002000200010

ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; VINALL, K.; SOPER, F.; HOLST, J.; GAMAGE, H.; PAUNGFOO-LONHIENNE, C.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT S. O paradigma do nitrato não sustenta a cana-de-açúcar. **Plos One**, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2011. DOI: 10.1371/journal.pone.0019045

SALVIANO, A. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; CARMO, J. F. A.; BRANDÃO, E. O. Acúmulo e exportação de macronutrientes pela cana de açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Científica Intelletto**, v. 2, n. 2, p. 16-27, 2017. DOI: 10.17648/intellecto-2525-9075-v2-n2-03

SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; MONTEIRO, F. A.; MACEDO, M. C. M.; EUCLIDES, V. P. B. Componentes morfológicos do capim Tanzânia cultivado em quatro condições de fertilidade do solo na região dos cerrados. **Boletim de Indústria Animal**, v. 62, n. 2, p. 91-99, 2005.

SILVA, L. G.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; SANTOS, R. A. Produção de mudas pré brotadas (MPB) de cana-de-açúcar em diferentes estratégias de irrigação. XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem. UFS - São Cristóvão/SE, 2015

SILVA, M. A.; SILVA, J. A. G.; ENCISO, J.; SHARMA, V.; JIFON, J. Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 620-627, 2008. DOI: 10.1590/S0103-90162008000600008

SILVA, N. F. da; CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C. de; MOURA, L. M. de F.; MOURA, L. C. de; TEIXEIRA, M. B. Crescimento da cana-de-açúcar sob aplicação de nitrogênio via gotejamento subsuperficial. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2014. DOI: 10.7127/rbai.v8n100188

SILVEIRA, J. A. G.; CROCOMO, O. J. Sintomas de deficiência de potássio induzidos pelo acúmulo de aminoácidos e amônia em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 3, p. 329-334, 1989.

SINGH, P. N.; SHUKLA, S. K.; BHATNAGAR, V. K. Optimizing soil moisture regime to increase water use efficiency of sugarcane (*Saccharum* spp. Hybrid complex) in subtropical India. **Agricultural Water Management**, v. 90, n. 9, p. 95-100, 2007. DOI: 10.1016/j.agwat.2007.02.008

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of surgarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v. 98, n. 2, p. 91-97, 2006. DOI: 10.1016/j.fcr.2005.12.009

SOUZA, C. F.; SILVA, C. R. da.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, Edição Especial - Irrigação, v. 1, n. 1, p. 26-42, 2016. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p26-42

SOUZA, J. K. C.; MESQUITA, F. O.; DANTAS NETO, J.; SILVA, M. B. R.; FARIAS, C. H. A.; LIMA, Y. B. Crescimento da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de

irrigação e adubação com zinco. **Agropecuária Científica do Semiárido**, v. 11, n. 1, p. 114-119, 2015.

TEN HOOPEN, F.; CUIN, T. A.; PEDAS, P. P.; HEGELUND, J. N.; SHABALA, S.; SCHJOERRING, J. K.; JAHN, T. P. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and Arabidopsis roots: molecular mechanisms and physiological consequences. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 9, p. 2303-2315, 2010. DOI: 10.1093/jxb/erq057

URIBE, R. A. M.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T.; SAAD, J. C. C. Estimativa do acúmulo de fitomassa da soqueira de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de N-fertilizante utilizando modelo de simulação. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 126-139, 2016. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n1p126-139

VALE, D. W. do.; PRADO, R. de M.; AVALHÃES, C. C.; HOJO, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 2, p. 189-196, 2011. DOI:10.5039/agraria.v6i2a550

VARBLE, J. L.; CHÁVEZ, J. L. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. **Agricultural Water Management**, v. 101, n. 1, p. 93 – 106, 2011. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.09.007

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. EP. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 713-721, 2005. DOI: 10.1590/S0100-69162005000300017

VIEIRA-MEGDA, M. X.; MARIANO, E.; LEITE, J. M.; FRANCO, H. C. J.; VITTI, A.C.; MEGDA, M. M.; KHAN, S. A.; MULVANEY, R. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 101, n. 2, p. 241-257, 2015. DOI: 10.1007/s10705-015-9676-7

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007. DOI: 10.1590/S0100-204X2007000200014

WALCH-LIU, P.; NEUMANN, G.; FRITZ, B.; ENGELS, C. Rapid effect of nitrogen form on leaf morphogenesis in tobacco. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 343, p. 227-237, 2000. DOI: 10.1093/jexbot/51.343.227

WIEDENFELD, B. Scheduling water application on drip irrigated sugarcane. **Agricultural Water Management**, v. 64, n. 2, p. 169-181. 2004. DOI: 10.1016/S0378-3774(03)00192-6