

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

Joelmir José Albuquerque de Farias

UMIDADE DO SOLO MEDIDA COM TDR E ESTIMADA PELO MÉTODO DA FAO-56
EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Rio Largo-AL

2014

JOELMIR JOSÉ ALBUQUERQUE DE FARIAS

UMIDADE DO SOLO MEDIDA COM TDR E ESTIMADA PELO MÉTODO DA FAO 56
EM CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada ao Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

Rio Largo- AL

2014

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade – CRB-1251

F224u Farias, Joelmir José Albuquerque de.
Umidade do solo medida com TDR e estimada pelo método da FAO-56 em cultivo de cana-de-açúcar / Joelmir José Albuquerque de Farias. – 2014.
62 f. : il.

Orientador: José Leonaldo de Souza.
Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção vegetal) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2014.

Bibliografia: f. 59-62.

1. Solos – Umidade. 2. Reflectometria no domínio do tempo.
3. Drenagem. 4. Cana-de-açúcar – Produção. I. Título.

CDU: 631.432.2

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, pilares fundamentais de minha vida, e aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. José Leonaldo de Souza, meu orientador, por todos os ensinamentos diários, pela paciência e por acreditar que esse trabalho seria possível.

Aos membros da banca, professor Dr. Guilherme Bastos Lyra, por todas as sugestões ao longo do desenvolvimento desse trabalho, professor Dr. Gilson Moura Filho, em especial, por ter cedido espaço no Laboratório de Solo, Água e Planta, para que fosse possível a calibração do TDR, e professor Dr. Ricardo Araujo Ferreira Júnior, pelo acompanhamento e ensinamento durante o período do experimento.

À equipe de pesquisa em irrigação da EMBRAPA Cruz das Almas – BA, em nome do professor Dr. Eugênio Ferreira Coelho, por ter cedido as sondas do TDR e pelo conhecimento compartilhado para o procedimento de calibração.

Aos amigos do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar, Maurício, Renato, Marshall, Adolpho, Pedro Luã, Constantino e Ricardo, pelo conhecimento compartilhado, pela amizade e pelo incentivo.

Aos amigos da turma de mestrado, Henrique, Felipe, Anderson, Jonhclécio, Paulo, Kleyton, Vinícius, Gleice, Érika, Laís, Débora, Ruy, Manoel e Adriano, por tantos bons momentos que passamos juntos.

Aos amigos da turma de graduação, em especial à Regina, Giordano e Euménes, que muito me incentivaram a cursar o mestrado.

À minha família, que tem incentivado e se orgulhado de cada passo meu; à minha namorada Thaiany, por estar ao meu lado.

Aos professores do curso de pós-graduação, pelo esforço em fazer o melhor possível pelo curso e pelos alunos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo financeiro e concessão da bolsa.

Toda a minha vida parece-me neste momento único e belo.

Tudo que eu fiz e vivi foi pra isso!

Iuri Gagarin

Afagar a terra

Conhecer os desejos da terra

Cio da terra, a propícia estação

E fecundar o chão

Milton Nascimento / Chico Buarque

RESUMO

O estudo da dinâmica da água no solo cultivado é de fundamental importância para o planejamento da produção, manejo da irrigação e validação de modelos computacionais de simulação de safras. Com o objetivo de mostrar o processo de calibração de um equipamento de TDR, para com ele medir a umidade de um perfil de solo cultivado com cana-de-açúcar na região de Rio Largo – AL e comparar com a estimativa obtida através do método FAO 56 foi conduzido um experimento numa área de 240 m² cultivada com cana soca, variedade RB98710, plantada em fileiras de 12 m de comprimento por 1 m de entrelinhas e irrigada por gotejamento. O solo local foi classificado como latossolo amarelo distrocoeso argissólico e o clima úmido megatérmico. As sondas de TDR foram instaladas em profundidades variando em 0,1 m até a profundidade máxima de 0,9 m. O equipamento de TDR foi calibrado localmente seguindo a metodologia de SILVA (2013), resultando em equações polinomiais do terceiro grau que relacionam a constante dielétrica aparente do solo (K_a) (verificado diretamente pelo TDR) com a umidade volumétrica (θ_v). O método FAO 56 utiliza dados meteorológicos para estimar a evapotranspiração potencial e , a partir dela, juntamente com informações da cultura e do solo, estimar o balanço hídrico e o armazenamento de água no solo. A calibração do TDR resultou em equações individuais para cada camada abrangida pela sonda (0,1 m) que apresentaram ajustes diferentes. A partir das médias dos valores de K_a e de θ_v foram determinadas equações universais para estimar a umidade em intervalos de 0,3 m e uma geral para o perfil até 0,9 m. Com os dados do TDR calibrados localmente, foi possível determinar curvas de distribuição hídrica no solo, que mostrou como a variação na densidade e granulometria do perfil pode influenciar na disponibilidade de água do solo. As variações no armazenamento de cada camada de 0,1 m de espessura durante o período em que o TDR esteve instalado diferiram entre si, mais uma vez revelando que a heterogeneidade do perfil interfere no armazenamento de água. A presença de um horizonte coeso também pôde ser verificada nos resultados de armazenamento individuais de cada camada e nas curvas de distribuição hídrica. O armazenamento estimado pelo método FAO 56 diferiu do verificado pelo TDR, principalmente no período úmido. A calibração do TDR é recomendada para cada tipo de solo e também para cada camada no caso do perfil ser heterogêneo. Equações universais empíricas e determinadas localmente não são recomendadas para estimar a umidade do perfil de solo da região de Rio Largo – AL. A presença de horizonte coeso interfere na distribuição hídrica no perfil do solo, diminuindo significativamente a drenagem e retendo a umidade, fornecendo-a para a cultura por ascensão capilar. O método FAO 56 para determinar o armazenamento não se aplica à região de Rio Largo – AL.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Reflectometria no Domínio do Tempo. Umidade do solo. Drenagem

ABSTRACT

The study of water dynamics in cultivated soil is crucial for the planning of production, irrigation management and validation of computer simulation crops models. In order to show the calibration of a TDR equipment to measure moisture with it a profile of soil cultivated with sugarcane in the region of Rio Largo - AL and compare with the estimate obtained by the FAO 56 method, an experiment was conducted in a 240 m² area planted with ratoon cane, variety RB98710, planted in rows 12 m long and 1 m between rows and drip irrigated. The local soil was classified as yellow latosol distrocohesive argisolic, the local climate is megathermic and humid. The TDR probes were installed at depths of 0.1 m to a maximum depth of 0.9 m. The TDR equipment was calibrated locally following the methodology of SILVA (2013) , resulting in the third degree polynomial equations, relating the apparent dielectric constant of the soil (K_a) (directly verified by TDR) to soil moisture (θ_v). The FAO 56 method uses meteorological data to estimate the reference evapotranspiration and, from it , along with information of culture and soil , estimating the water balance and water storage in the soil. The calibration of the TDR resulted in individual equations of each layer covered by the probe (0.1 m) which had different settings. From the average of the values of K_a and θ_v were certain universal equations for estimating moisture in intervals of 0.3 m for a general profile up to 0.9 m . With the data from TDR locally calibrated, we determined curves of water distribution in the soil, which showed how the variation in density and particle size profile can influence the availability of soil water. The variations in the storage of each layer of 0.1 m thick during the period when the TDR has been installed differ, again showing that the uneven profile interfere with the storage of water. The presence of a cohesive horizon duripan type could also be seen in the results of each individual storage layer and the curves of water distribution. The estimated by FAO 56 method storage differed from verified by TDR, especially during the wet season. Calibration of TDR is recommended for each soil type for each layer and also in the case of the profile is heterogeneous. Universal empirical equations determined locally and are not recommended for estimating the moisture profile of soil from Rio Largo - AL. The presence of duripan interferes with the water distribution in the soil profile, significantly reducing drainage and retaining moisture, providing it to the culture by capillarity. The FAO 56 method to determine the storage does not apply to the region of Rio Largo - AL.

Keywords: Sugarcane. Time Domain Reflectometry. Soil moisture. Drainage

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Distribuição da safra de cana-de-açúcar no Brasil para o período 2014/15.....15
- Figura 2.** Esquema simplificado do balanço hídrico no solo. Setas verdes indicam entrada de água no sistema e setas vermelhas indicam saída. Os componentes são precipitação (P), irrigação (I), escoamento superficial (ES), transpiração (T), evaporação a partir do solo (E), drenagem (D) e ascensão capilar (AC).....17
- Figura 3.** Área experimental com a cana na fase fenológica inicial (A); Cana na fase fenológica de desenvolvimento (B e C); Detalhe mostrando o fechamento de entrelinhas (D).....21
- Figura 4.** Composição granulométrica e densidade do solo nos horizontes Ap1, Ap2, AB, Bw1 e Bw2 do perfil.....22
- Figura 5.** Adubação e sistema de irrigação. A) Adubação de cobertura; B) Parte da linha principal do sistema de irrigação; C) Cabeçal de controle automatizado do sistema de irrigação; D) Formação de bulbo visto da superfície.....24
- Figura 6** – Equipamento de TDR. A) Caixa ambiental contendo: 1- TDR100, 2- *Datalogger* modelo CR10X, 3- Unidade de acumulação de energia elétrica solar; B) Sondas utilizadas; C) Poço de inserção das sondas em profundidade além da superfície; D) Panorama mostrando a torre com o equipamento de TDR e painel solar ao centro, as caixas contendo os multiplexadores nos lados e a estação meteorológica do CECA ao fundo.....26
- Figura 7.** Coleta e preparação das amostras para calibração do TDR. A) Coleta de amostras em campo; B) Fechamento do fundo do tubo com uma tela de nylon; C) Disposição das amostras já prontas; D) Conjuntos tubo-solo-sonda-tela, mergulhados em água..... 27
- Figura 8** – Calibração do TDR. A) Leitura dos dados de umidade do TDR; B) Processo de secagem forçado com lâmpadas incandescentes; C) Pesagem do conjunto tubo-solo-sonda-tela em balança analítica; D) Estufa de secagem adaptada com lâmpadas incandescentes28
- Figura 9.** Rizometria em trincheira de 1,0 m de profundidade. A) Diagrama de localização dos planos da trincheira; B) Plano ‘B’ indicado no diagrama ‘A’ mostrando até 0,7 m de profundidade; C) Plano ‘C’ indicado no diagrama ‘A’, mostrando até 0,6 m de profundidade; D) Detalhe ‘D’ do plano ‘B’ indicado no diagrama ‘A’, mostrando os primeiros 0,2 m do sistema radicular.33

- Figura 10.** Curvas de calibração do TDR relacionando umidade volumétrica (θ_g) e constante dielétrica aparente (K_a) para cada camada do solo abrangida por uma sonda: a) 0-0,10 m; b) 0,10-0,20 m; c) 0,20-0,30 m; d) 0,30-0,40 m; e) 0,40-0,50 m; f) 0,50-0,60 m; g) 0,60-0,70 m; h) 0,70-0,80 m; i) 0,80-0,90 m..... 36
- Figura 11.** Curvas de calibração médias do TDR relacionando umidade volumétrica (θ_g) e constante dielétrica aparente (K_a), para camadas médias com espessura de 0,3 m e para o perfil total medido, 0,9 m: a) 0-0,30 m; b) 0,30-0,60 m; c) 0,60-0,90 m; d) 0-0,90 m38
- Figura 12.** Comparação entre equações de calibração do TDR de cada camada individual (θ_o) com as equações médias das camadas agrupadas (θ_e) para uma série de dados de K_a medidos em campo: a) Equação 0-0,1 m x 0-0,3 m; b) Equação 0,1-0,2 m x 0-0,3 m; c) Equação 0,2-0,3 m x 0-0,3 m; d) Equação 0,3-0,4 m x 0,3-0,6 m; e) Equação 0,4-0,5 m x 0,3-0,6 m; f) Equação 0,5-0,6 m x 0,3-0,6 m; g) Equação 0,6-0,7 m x 0,6-0,9 m; h) Equação 0,7-0,8 m x 0,6-0,9 m; i) Equação 0,8-0,9 m x 0,6-0,9 m; j) Equação 0-0,1 m x 0-0,9 m; a) Equação 0-0,1 m x 0-0,9 m; b) Equação 0,1-0,2 m x 0-0,9 m; c) Equação 0,2-0,3 m x 0-0,9 m; d) Equação 0,3-0,4 m x 0-0,9 m; e) Equação 0,4-0,5 m x 0-0,9 m; f) Equação 0,5-0,6 m x 0-0,9 m; g) Equação 0,6-0,7 m 0-0,9 m; h) Equação 0,7-0,8 m x 0-0,9 m; i) Equação 0,8-0,9 m x 0-0,9 m.41
- Figura 13.** Comparação entre equações de calibração do TDR locais com as equações universais de LEDIEU et al (1986) e TOPP, DAVIS e ANNAN (1980).....43
- Figura 14.** Elementos meteorológicos diários e irrigação aplicada durante o ciclo da cultura. Irradiância solar global média (H_g), precipitação (P), irrigação (I), temperatura média (T_m), umidade relativa média (UR_m)..... 44
- Figura 15.** Evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de PENMAN-MONTEITH FAO, evapotranspiração da cultura (ET_C) e evapotranspiração real, pelo método FAO em escala decendial durante o ciclo da cultura..... 46
- Figura 16.** Evaporação (E), transpiração da cultura (TC), transpiração real da cultura (TR) e precipitação (P) em escala decendial.46
- Figura 17.** Perfil de redistribuição de água no solo após um evento de chuva de 9,14 mm na fase fenológica inicial.....47
- Figura 18.** Perfil de redistribuição de água no solo após uma irrigação de 32,96 mm na fase fenológica intermediária..... 48

Figura 19. Perfil de redistribuição de água no solo após um evento de chuva de 37,6 mm na fase fenológica de crescimento	49
Figura 20. Perfil de redistribuição de água no solo após um evento de chuva de 80,51 mm na fase fenológica final	50
Figura 21. Variação no armazenamento de cada camada do perfil do solo, em escala diária, durante o período de medidas do TDR. Camada de 0-0,1 m (a); 0,1-0,2 m (b); 0,2-0,3 m (c); 0,3-0,4 m (d); 0,4-0,5 m (e); 0,5-0,6 m (f); 0,6-0,7 m (g); 0,7-0,8 m (h); 0,8-0,9 m (i).....	51
Figura 22. Variação no armazenamento, em escala diária estimado pelo método do boletim FAO 56 e medido pelo TDR durante o período em que o TDR esteve instalado no campo. A área hachurada destaca o período onde houve maior semelhança entre os dados estimados e observados.	53
Figura 23. A) Série destacada na Figura 23, mostrando a relação entre o armazenamento estimado pelo método FAO 56 e observado pelo TDR; B) Comparação entre os dados estimados pela FAO 56 e observados pelo TDR	54
Figura 24. Altura, comprimento do colmo (C. COLM) e número de plantas por metro quadrado (N.PLT) em função dos graus-dia acumulados com temperatura base de 16 °C.....	55
Figura 25. Variação no IAF em função dos graus dia acumulados para o ciclo da cultura	57

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Valores do conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (CC), ponto de murcha (PM) e água disponível (AD) para cada horizonte do solo na área experimental.....22
- Tabela 2.** Densidade de partículas (Dp), densidade do solo (Ds) e porosidade total (α) para cada horizonte do solo na área experimental23
- Tabela 3.** Capacidade de campo (CC), ponto de murcha (PM) e densidade do solo (Ds) médios interpolados para cada camada do solo.....24
- Tabela 4.** Coeficientes das equações polinomiais do terceiro grau, do tipo $y = y_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3$, onde y é a unidade volumétrica e x a constante dielétrica aparente do solo.....37
- Tabela 6.** Duração das fases fenológicas, precipitação (P), irrigação (I), evapotranspiração de referência (ET_o), coeficiente da cultura (K_c), evapotranspiração da cultura (ET_c) para a cultura da cana irrigada.....44
- Tabela 7.** Coeficientes de ajuste da equação de Boltzman para altura do dossel e comprimento do colmo.....45
- Tabela 8.** Coeficientes da regressão linear, do tipo $y = a + bx$, ajustada aos graus dia acumulados, para a variável número de plantas por m².....56
- Tabela 9.** Parâmetros da equação modelo log normal para o índice de área foliar ajustado pelos graus dia acumulados (GDA)..... 57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Cana-de-açúcar	15
2.2 Água no solo	16
2.3 Reflectometria de domínio do tempo (TDR)	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Área experimental	21
3.2 Medida da umidade do solo com o TDR	25
3.3 Variáveis ambientais	29
3.4 Variáveis da cultura	30
3.5 Disponibilidade de água no solo segundo o método FAO 56	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Calibração do TDR	35
4.2 Condições meteorológicas durante o cultivo	43
4.3 Distribuição de água no perfil do solo	47
4.4 Armazenamento de água no solo	50
4.5 Variáveis de crescimento da cultura	55
5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59

1- INTRODUÇÃO

O entendimento dos processos físicos que regem a dinâmica de água no sistema solo-planta-atmosfera é um dos principais ramos de estudo da pesquisa agrícola. A preocupação com a disponibilidade dos recursos hídricos, muitas vezes escassos, é um dos subsídios para a busca de um manejo que integre baixo consumo de água com altas produtividades, ou seja, a busca por melhoria na eficiência no uso da água. Conhecer a quantidade de água presente no solo, sua capacidade de retenção, distribuição e disponibilização para as plantas é um dos pontos mais importantes para o planejamento da agricultura, principalmente no que se refere ao manejo da irrigação.

O balanço hídrico é um conceito que enlaça todos os meios de entrada e saída de água no sistema, numa forma equacional que permite a estimativa de qualquer um dos componentes. Porém, a difícil observação de certos termos, como a drenagem, a ascensão capilar e a evapotranspiração da cultura, faz com que seja necessário o uso de metodologias para estimar com maior proximidade esses termos. Diversos modelos computacionais estão disponíveis para este fim, permitindo a simulação de resultados com precisão, desde que estejam calibrados para as condições locais. ALLEN et al. (1998) desenvolveram um método baseado em variáveis ambientais juntamente com o conhecimento de dados da cultura e do solo para estimar termos do balanço hídrico e permitir um planejamento da irrigação. Mesmo assim, para comprovar a eficácia dos modelos, fazem-se necessárias as observações *in situ* das variáveis estimadas.

Muitos métodos são empregados para observar a quantidade de água no solo. O método gravimétrico é o método direto de maior acurácia, tendo como desvantagem ser um método destrutivo, além da demora na obtenção dos resultados. Também, o resultado oferecido informa apenas a água contida no instante em que é feita a amostragem, sendo um diagnóstico meramente ilustrativo e pontual, salvo quando utilizado para determinar as propriedades hidráulicas do solo.

A aplicabilidade do método gravimétrico fica reduzida quando o objetivo é estimar termos do balanço hídrico, pois a água no solo é dinâmica e seu movimento depende, entre outras, de características inerentes ao perfil do solo e ao tipo de cultivo empregado. Os trabalhos de VAN BAVEL et al. (1968a) e VAN BAVEL et al. (1968b) verificaram as propriedades hidráulicas de um solo a partir de medidas em campo, determinando curvas de redistribuição de água no solo nu e no solo cultivado. Para que estes estudos fossem possíveis, eles utilizaram uma sonda de nêutrons, que é um método indireto para a determinação da umidade do solo, baseada na correlação da moderação de nêutrons pelo hidrogênio contido no solo, que em sua

maioria, deriva da quantidade de água. O trabalho de HILLEL, KRENTOS E STYLIANOU (1972) testou um método de determinação da drenagem interna de um solo, utilizando-se para isso de tensiômetros, que são dispositivos que medem diretamente a tensão de água no solo, e a partir do conhecimento prévio da curva de retenção, estima indiretamente o conteúdo de água deste solo. A precisão dos tensiômetros é relativamente boa, porém ainda é necessária a ida ao campo para se fazer a leitura dos manômetros (vacuômetros) de cada tensiômetro.

Um método de determinação do conteúdo de água no solo que seja preciso, pouco invasivo, rápido e passível de automação é de notável importância, pois fornece informações, como caracterização das propriedades do solo e uso da água pela cultura, permitindo tomadas de decisão *just-in-time*, até mesmo remotamente. Nesse contexto, a técnica da reflectometria de domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry* – TDR) satisfaz muito bem às exigentes necessidades da ciência e da agricultura de precisão. Criada inicialmente para detectar falhas em cabos coaxiais de sistemas eletrônicos, foi só a partir dos trabalhos de HOEKSTRA E DELANEY (1974) e TOPP, DAVIS E ANNAN (1980) que a técnica TDR passou a ser largamente utilizada na determinação de água no solo, através da correlação entre a constante dielétrica do solo e a quantidade de água, medindo-se diretamente a atenuação na velocidade de propagação de uma onda.

Como todo método indireto, o equipamento de TDR necessita ser calibrado localmente, apesar de existirem relações universais, muito usadas, entre a constante dielétrica aparente e a quantidade de água no solo, sendo as mais notáveis as determinadas por TOPP, DAVIS E ANNAN (1980) e por LEDIEU et al. (1986). A grande desvantagem é o alto custo do equipamento, principalmente quando a finalidade não seja científica e sim, comercial.

O objetivo desse trabalho foi mostrar a calibração do TDR100 para o solo da região de Rio Largo – AL e a distribuição hídrica no perfil do solo, medida através da técnica da TDR e estimada com o método do balanço hídrico proposto no boletim FAO 56, para a cultura da cana-de-açúcar.

radicular da cana-de-açúcar encontra-se próxima da superfície do solo e sua distribuição é semelhante à maioria das gramíneas tropicais, com uma diminuição exponencial na quantidade de raiz em função do aumento da profundidade. O sistema radicular da cana modifica-se facilmente em respostas à irrigação e a impedimentos físicos no solo. Cerca de 50% do sistema radicular encontra-se nos 20 cm iniciais do solo (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005). SOUSA et al. (2013) observaram em um experimento de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento com efluente de esgoto doméstico, que a área e profundidade do sistema radicular da cana foram reduzidos. FARIAS et al. (2010) concluíram que à medida que a lâmina de irrigação aplicada à cana aumenta, as zonas com alta densidade de raízes tornam-se mais superficiais.

2.2- Água no solo

O solo pode ser visto como um reservatório. Porém, este reservatório é dinâmico, ou seja, a água armazenada não é constante, visto que sofre alterações em sua quantidade pelos termos do balanço hídrico. A quantidade de água disponível para a cultura se encontra num intervalo entre limites definidos como armazenamento na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha (PM). A água que esteja além da capacidade de campo do solo pode ser absorvida pela planta enquanto ocorre a drenagem (RITCHIE, 1981).

O balanço de água no solo é calculado a partir da contabilidade das variáveis de entrada e saída de água no sistema de um determinado volume de solo conhecido (Figura 2), pelos termos da equação simplificada a seguir:

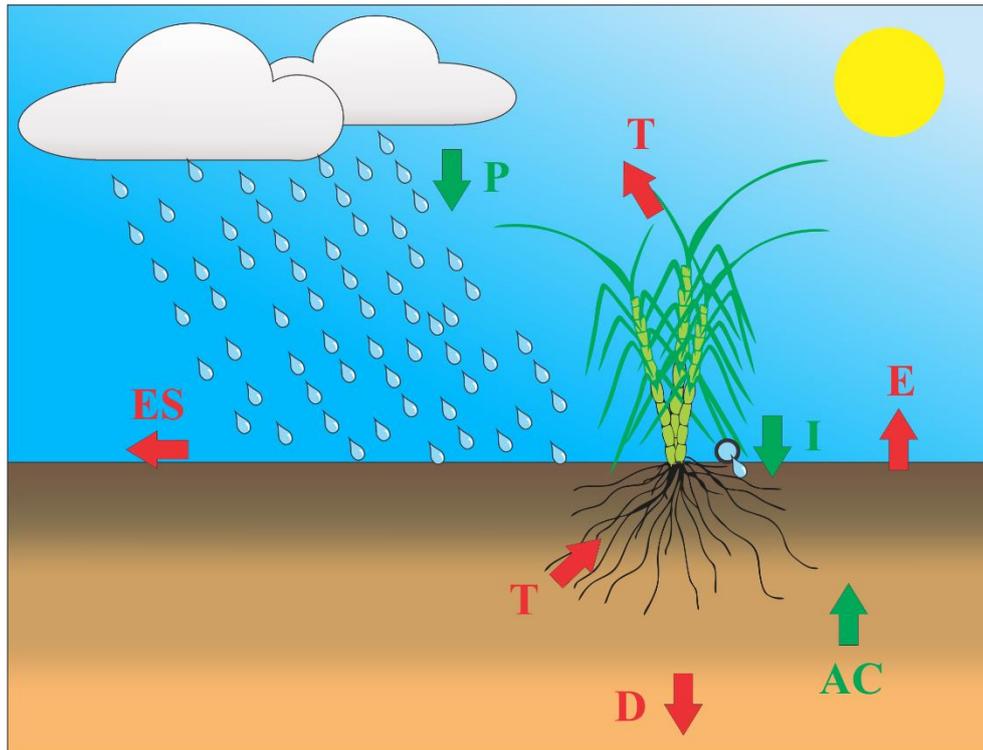
$$P + I - ES - E - T - D + AC \pm \Delta ARM_z = 0 \quad (1)$$

Em que P é a precipitação, I a irrigação, ES o escoamento superficial, E a evaporação da água diretamente da superfície do solo, T a transpiração, D a drenagem para além do sistema radicular, AC a ascensão capilar e o ΔARM_z a variação no armazenamento, definido pela seguinte relação:

$$\Delta ARM_z = ARM_{z(i)} - ARM_{z(i-1)} \quad (2)$$

Em que $ARM_{z(i)}$ é o valor do armazenamento para o momento i e $ARM_{z(i-1)}$ é o armazenamento para o momento i anterior. Convencionalmente, os termos do balanço hídrico são dados em milímetros (mm).

Figura 2. Esquema simplificado do balanço hídrico no solo. Setas verdes indicam entrada de água no sistema e setas vermelhas indicam saída. Os componentes são precipitação (P), irrigação (I), escoamento superficial (ES), transpiração (T), evaporação a partir do solo (E), drenagem (D) e ascensão capilar (AC).



Fonte: Autor (2014)

Apesar de fácil compreensão, estimar cada termo da equação do balanço hídrico pode ser difícil na prática, devido à complexidade do processo envolvido. Tanto que a solução da Equação 1 depende de que se desconheça apenas um dos termos do balanço hídrico. As maiores variações nas estimativas dos termos do balanço hídrico ocorrem para a componente drenagem, principalmente em períodos chuvosos, que reflete diretamente na estimativa da evapotranspiração (GHIBERTO et al., 2011).

O termo mais importante do balanço hídrico do ponto de vista da produção vegetal é a transpiração, que é definida como a parcela de água armazenada no solo que é absorvida pelo sistema radicular e utilizada para a produção de matéria seca. CAMPBELL E DIAZ (1988) consideram que a água que sai do sistema por transpiração tem pequeno efeito nos demais

termos do balanço hídrico, mas é afetada fortemente por eles, visto que é a parte de água restante após cada um dos termos estar satisfeito.

KLAIJI E VACHAUD (1992) desenvolveram uma metodologia para determinar o balanço hídrico de uma área com solo arenoso cultivada com milho na Nigéria a partir de dados de umidade no perfil de solo. A metodologia simplificava ainda mais os termos do balanço hídrico, retirando o escoamento superficial, visto que o solo era arenoso, e a ascensão capilar, devido à alta profundidade do lençol freático. Como a cultura foi em sequeiro, restaram apenas os componentes precipitação, drenagem, evapotranspiração e variação no armazenamento. Eles consideraram que a variação na camada de solo abaixo do sistema radicular caracteriza a drenagem e quando subtraída da chuva, o restante seria a evapotranspiração. Os resultados desse balanço hídrico com termos simplificados foram satisfatórios para aquelas condições.

Uma vez no solo, a água passa a satisfazer cada um dos termos do balanço hídrico, evaporando em parte diretamente à atmosfera, ficando em parte armazenada e disponibilizada para a cultura, outra parte drena para além da zona radicular; a água então no solo movimentase constantemente, num processo de redistribuição, influenciado por um gradiente hidráulico. Esse gradiente rege a velocidade com que ocorre a distribuição, visto que conforme a frente molhada avança, o gradiente diminui (REICHARDT E TIMM, 2012). VAN BAVEL, BRUST E STIRK (1968b) fizeram um estudo para determinar as propriedades hidráulicas de um solo argiloso cultivado com sorgo, comparando a depleção da umidade do solo com a taxa de evaporação em situações com o solo nu, coberto com plástico e cultivado e concluíram que o movimento de água no solo continua muitos dias após a aplicação de água.

2.3. Reflectometria de domínio do tempo (TDR)

Os métodos para determinar o conteúdo de água no solo foram classificados por GRAYSONE E WESTERN (1998) em três grupos: 1- processamento de sinais de sensoriamento remoto; 2- estimativa da umidade do solo através de modelos matemáticos de balanço hídrico; 3- através de observações e ensaios de campo. Para CHAMPAGNE (2011), a estimativa de umidade do solo através de sensoriamento remoto é pouco aplicável em condições onde a produtividade agrícola é muito sensível à quantidade de água e em locais onde a temperatura tem grande influência na produtividade. Para CAMPBELL E DIAZ (1988), fora a precipitação, os componentes do balanço hídrico, incluindo conteúdo de água no solo, são difíceis de medir, o que requer um modelo matemático para isso. Dentre as avaliações em

campo, a TDR caracteriza-se por ser não destrutiva e permitir a continuidade e automação na coleta de dados (COELHO; VELLAME; COELHO FILHO, 2005).

A técnica da TDR consiste num método indireto para a determinação da quantidade de água no solo, através da velocidade de propagação de um pulso eletromagnético em função de uma constante K_a , chamada constante dielétrica aparente do meio, que é o fator de redução exercido pelo meio na condutividade de cargas ou de uma força. Esse pulso é conduzido através de uma guia de onda (sonda), normalmente terminal a um cabo coaxial (LACERDA et al., 2005; EVETT et al., 2003). A característica de propagação de uma onda eletromagnética no solo depende principalmente de sua condutividade elétrica, a partir daí, é possível determinar a constante dielétrica do meio. A água apresenta uma constante dielétrica alta (em torno de 80) em relação a do solo seco, (<5), portanto, é seguro afirmar que a variabilidade nos valores de constante dielétrica está atrelada, principalmente, à quantidade de água no solo. Essa técnica pode ser utilizada para determinar o balanço hídrico, uma vez que monitora de forma constante a variação na quantidade de água no solo. O sistema de aquisição de dados pode ser automatizado e a densidade de amostragem é ilimitada. A distribuição de sondas no solo permite verificar a variabilidade espacial da mudança no conteúdo de água no solo e a inserção das mesmas não modifica sua estrutura física, não comprometendo inclusive a distribuição do sistema radicular. Outra vantagem é a inexistência de riscos para a saúde humana e ambiental (MASTRORILLI et al., 1997).

Os pulsos do TDR estão no espectro de frequência entre 1 MHz e 1 GHz e são enviados por um cabo coaxial até a guia de onda (sonda), que é formada por hastes de aço inoxidável, e está inserida no solo. Os pulsos refletidos apresentam perturbações na impedância do sinal. Uma destas perturbações refere-se ao ponto de conexão entre a guia de onda e o cabo coaxial, a outra se refere ao reflexo da onda na extremidade da sonda. Quando observado no gráfico que caracteriza o sinal da onda refletida, a distância aparente entre as duas perturbações é parte da função que determina a constante dielétrica do solo (SILVA, et al., 1998; LEDIEU et al., 1986). A velocidade de propagação da onda no meio é relativa à velocidade de propagação de um pulso eletromagnético no vácuo, onde V_p é a velocidade do pulso no meio, c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 3.10^8 \text{ m s}^{-1}$) e K_a constante dielétrica do meio (Eq. 3). No solo, leva-se em conta a constante dielétrica de cada componente geral [ar ($K = 1$); partículas do solo ($K = 3$ a 5); água ($K = 81$)] para compor a constante dielétrica aparente, K_a .

$$K_a = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (3)$$

Seguramente, o estudo das propriedades dielétricas mostrou que as características de uma onda dependem do material submetido ao pulso eletromagnético e a velocidade de propagação dessa é função da constante dielétrica do meio. A partir dessas observações, é possível chegar a uma relação entre a umidade volumétrica no solo (θ_v) e a constante dielétrica aparente do mesmo (K_a), no que LEDIEU et al. (1986) determinou como sendo a seguinte equação:

$$\theta_v = 0.1138\sqrt{K_a} - 0.1758 \quad (4)$$

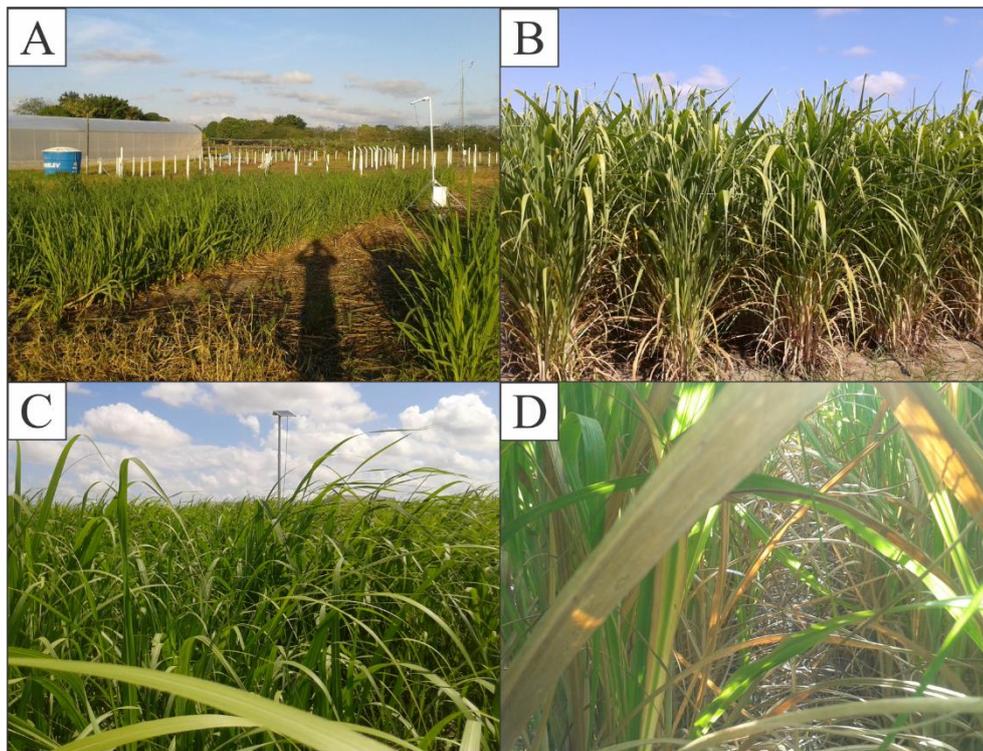
3- MATERIAL E MÉTODOS

3.1- Área experimental

Em uma área de 240 m² (Figura 3A) localizada a 5 m da estação agrometeorológica automática, no Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), situado à BR 104 N, km 84, município de Rio Largo-AL, com coordenadas 09°28'02"S; 35°49'43"W e 127 metros de altitude foi cultivada com cana-de-açúcar (*Sacharun spp.*), na qual a variedade RB 98710, foi a estudada neste trabalho.

Essa cultivar faz parte da geração de variedades liberadas em 2010 pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar da UFAL (PMGCA-UFAL), membro da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA). Apresenta como características desenvolvimento lento com hábito de crescimento ereto (Figura 3C), brotação muito boa, alto perfilhamento, bom fechamento de entrelinhas (Figura 3D), alta produtividade agrícola, com média de 120 t ha⁻¹ e alto teor de sacarose (DAROS et al., 2010).

Figura 3. Área experimental com a cana na fase fenológica inicial (A); Cana na fase fenológica de desenvolvimento (B e C); Detalhe mostrando o fechamento de entrelinhas (D).



Fonte: Autor (2014)

O solo local foi classificado de acordo com EMBRAPA (2003) como Latossolo Amarelo Distrocoeso Argissólico (LAdx), com textura média/argilosa, horizonte A moderado e relevo plano. As características hídricas estão na Tabela 1 e sua composição granulométrica e densidade encontram-se na Figura 4. A profundidade do perfil de solo estudado nesse trabalho foi 0,9 m, abrangendo os horizontes Ap1, Ap2, AB, Bw1 e parte do Bw2, que possuem características físicas distintas e diferentes espessuras (Tabela 1).

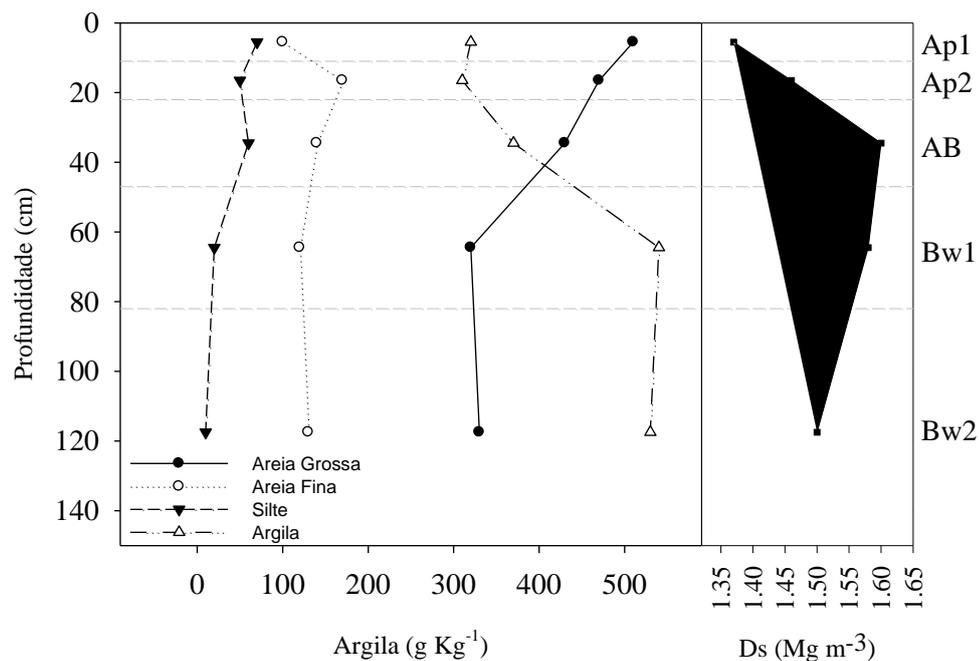
Tabela 1. Valores do conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (CC), ponto de murcha (PM) e água disponível (AD) para cada horizonte do solo na área experimental

Horizonte	Camada (cm)	CC ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	PM ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	AD ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Ap1	0-11	0,207	0,124	0,083
Ap2	11-22	0,231	0,139	0,092
AB	22-47	0,261	0,157	0,104
Bw1	47-82	0,302	0,181	0,121
Bw2	82-153	0,345	0,207	0,138

Nota: Capacidade de campo em -10 kPa; Ponto de murcha em -1500 kPa

Fonte: COSTA (2003)

Figura 4. Composição granulométrica e densidade do solo nos horizontes Ap1, Ap2, AB, Bw1 e Bw2 do perfil.



Fonte: Adaptado de COSTA (2003).

A partir dos valores de densidade de partículas (Dp) e densidade do solo (Ds) foi possível chegar à porosidade total (α) (Tabela 2), que expressa o quanto de volume do solo pode ser ocupado por ar e água; logicamente, a umidade do solo quando saturado é igual à porosidade total do mesmo.

Tabela 2. Densidade de partículas (Dp), densidade do solo (Ds) e porosidade total (α) para cada horizonte do solo na área experimental.

Horizonte	Dp (Mg m ⁻³)	Ds (Mg m ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)
Ap1	2,60	1,37	0,473
Ap2	2,66	1,46	0,451
AB	2,71	1,60	0,409
Bw1	2,60	1,58	0,392
Bw2	2,60	1,50	0,423

Fonte: COSTA (2003)

O clima é úmido, megatérmico, segundo a classificação de THORNTHWAITE E MATHER (1955), apresentando deficiência de água moderada durante o verão e excesso durante o inverno. O período chuvoso concentra-se entre os meses de março a agosto e o período seco entre setembro a fevereiro. Entre os anos de 1972 e 1999, a temperatura variou entre 19,3 °C em agosto e 31,7 °C em janeiro, com uma média anual de 25,4 °C. A precipitação média anual é de 1818 mm (SOUZA, NICÁCIO E MOURA, 2005).

O perfil estudado foi dividido em camadas de 0,10 m devido à distribuição de sondas do TDR, para facilitar a interpretação dos dados e possibilitar a calibração do TDR, os valores de capacidade de campo (CC), ponto de murcha (PM) e densidade do solo (Ds) foram interpolados por centímetro, utilizando o software Microcal Origin®, e então feitas as médias por faixas de 0,10 m, que constam na Tabela 3.

O cultivo foi em socaria, em 12 linhas de 20 m de comprimento e 1 m de entrelinhas, com data de corte da cana planta no dia 24 de outubro de 2012. Aos 42 dias após o corte (DAC), realizou-se uma adubação de cobertura (Figura 5A), com 92,12 kg ha⁻¹ de N, 83,75 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 143,38 kg ha⁻¹ de K₂O. Periodicamente, realizaram-se tratos culturais para o controle de plantas daninhas. Não foi constatada a presença de praga ou doença durante o cultivo.

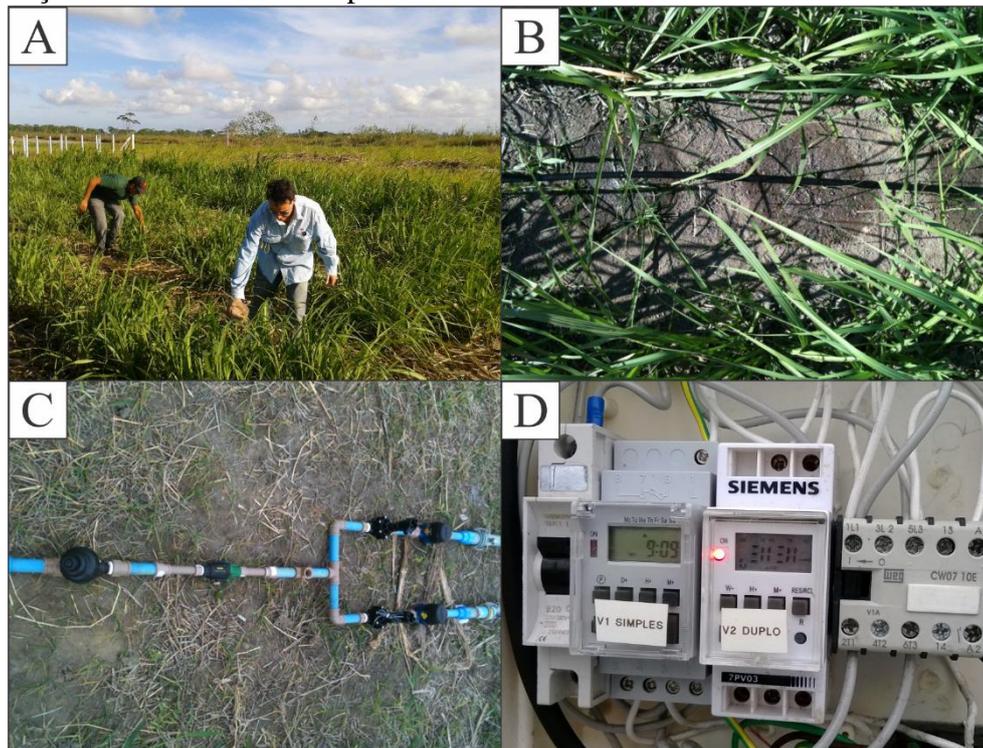
A irrigação foi por gotejamento superficial, com mangueiras de 16 mm contendo emissores espaçados em 0,5 m com vazão nominal de 1,5 L h⁻¹ (Figura 5B). Para cada linha de cana, foi disposta uma mangueira com emissores. Essas mangueiras foram então

Tabela 3. Capacidade de campo (CC), ponto de murcha (PM) e densidade do solo (Ds) médios interpolados para cada camada do solo.

Camada (m)	CC ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	PM ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Ds (Mg m^{-3})
0-0,1	0,212	0,127	1,389
0,1-0,2	0,230	0,138	1,452
0,2-0,3	0,247	0,149	1,531
0,3-0,4	0,263	0,158	1,593
0,4-0,5	0,276	0,165	1,592
0,5-0,6	0,290	0,174	1,585
0,6-0,7	0,303	0,181	1,577
0,7-0,8	0,311	0,186	1,563
0,8-0,9	0,319	0,191	1,548
0-0,3	0,232	0,139	1,468
0,3-0,6	0,277	0,166	1,590
0,6-0,9	0,311	0,187	1,563
0-0,9	0,275	0,165	1,543

Fonte: Adaptado de COSTA (2003)

Figura 5. Adubação e sistema de irrigação. A) Adubação de cobertura; B) Parte da linha principal do sistema de irrigação; C) Cabeçal de controle automatizado do sistema de irrigação; D) Formação de bulbo visto da superfície.



Fonte: Autor (2014); LARAS(2011)

conectadas à linha principal, dotada de um filtro de discos 120 mesh e hidrômetro, para o registro da lâmina real aplicada (Figura 5C). A bomba, de ½ CV, conectada a um reservatório de 10.000 L de água, com um cabeçal de controle automatizado, programado para um turno de rega de dois dias (Figura 5D). A lâmina aplicada foi determinada com base na evapotranspiração diária média da cultura referenciada à semana anterior. Quinzenalmente, a uniformidade de aplicação do sistema de irrigação foi verificada e o tempo de irrigação ajustado de acordo com recomendações de FERREIRA JÚNIOR, 2013.

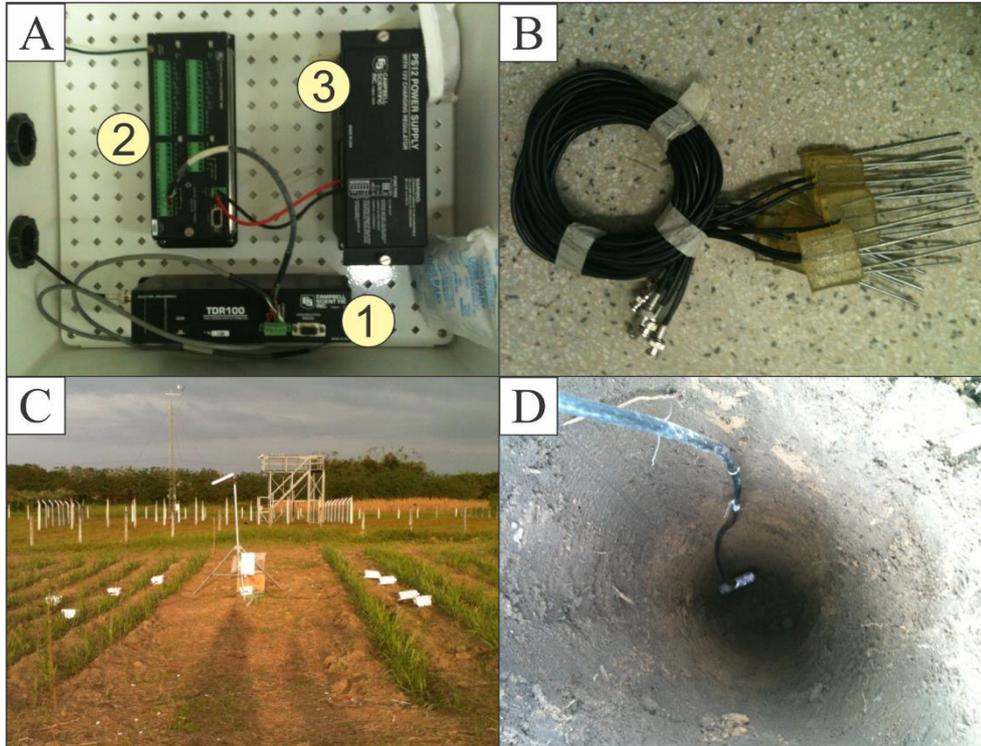
3.2.- Medida da umidade do solo com o TDR

Durante o experimento, dados de umidade real do solo foram obtidos através da técnica de reflectometria de domínio do tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*). O equipamento utilizado foi um TDR100 (Figura 6A-1) e os dados foram obtidos e armazenados de forma automática numa unidade de aquisição de dados e controle (modelo CR10X), programada para adquirir os dados a cada 20 minutos (Figura 6A-2), ambos os equipamentos são da Campbell Scientific. As sondas de TDR foram compostas de três hastes de aço inoxidável com diâmetro de 0,003 m, comprimento de 0,1 m e espaçadas entre si por 0,017 m, fixadas a um suporte de resina epóxi (COELHO et al. 2005) (Figura 6B). Foram inseridas na posição vertical no solo e distribuídas no local do experimento em oito pontos (Figura 6C), cobrindo a máxima área possível. Em cada ponto, as sondas foram inseridas desde a superfície em intervalos de 0,1 m até a profundidade máxima de 0,9 m (Figura 6D).

O sistema de aquisição de dados foi programado para transformar os valores da condutividade elétrica aparente do solo (K_a), obtidos pelo TDR100, em valores de umidade volumétrica (θ) de cada perfil, através da relação entre K_a e umidade volumétrica proposta por LEDIEU et al. (1986) (Eq. 2). Para maior acurácia na determinação local da umidade, visto que o solo exibe um perfil heterogêneo, foi feita a calibração do TDR.

A metodologia utilizada na calibração foi descrita por SILVA (2013). Construíram-se cilindros, seccionando um tubo de PVC com diâmetro nominal 0,1 m em pedaços de 0,15 m de comprimento. Com esses cilindros, em uma trincheira de 1,0 m de profundidade aberta no local do experimento, retirou-se amostras indeformadas de cada camada abrangida pelas sondas de TDR (Figura 7A).

Figura 6 – Equipamento de TDR. A) Caixa ambiental contendo: 1- TDR100, 2- *Datalogger* modelo CR10X, 3- Unidade de acumulação de energia elétrica solar; B) Sondas utilizadas; C) Poço de inserção das sondas em profundidade além da superfície; D) Panorama mostrando a torre com o equipamento de TDR e painel solar ao centro, as caixas contendo os multiplexadores nos lados e a estação meteorológica do CECA ao fundo.

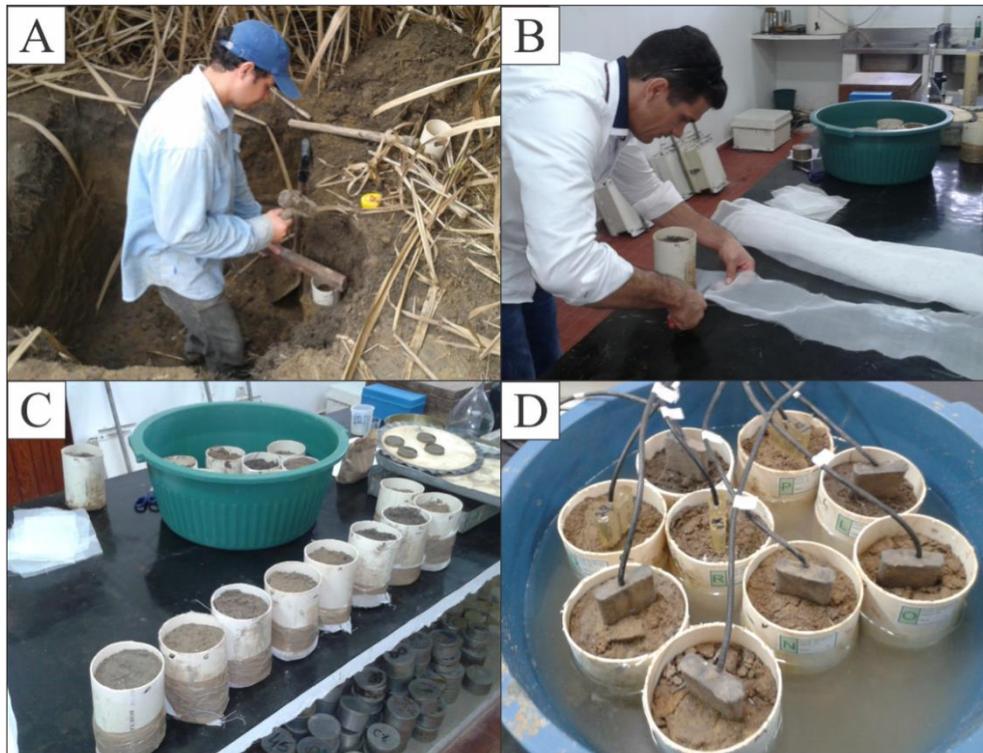


Fonte: LARAS, 2011

As amostras foram levadas ao Laboratório de Solos, Água e Planta da UFAL e cada cilindro teve seu fundo coberto com tela de nylon de malha fina, para evitar a perda de solo e possibilitar o fluxo de água (Figura 7B e C). Em seguida, em cada amostra foi inserida uma sonda de TDR, caracterizando o conjunto tubo-solo-sonda-tela, que foram então imersos em água até o nível de 2/3 da altura do solo (Figura 7D), permanecendo nestas condições durante 24 horas, para que o solo ficasse saturado. O procedimento de calibração iniciou-se logo em seguida e consistiu na pesagem do conjunto tubo-solo-sonda-tela em balança de precisão com resolução de duas casas decimais de grama (Figura 8B) seguida da medição da umidade com o TDR, o que foi possível através da leitura direta dos dados através do software PC400 da Campbell Scientific (Figura 8A). Esse procedimento foi inicialmente em temperatura ambiente, e seguiu em intervalos que variaram de minutos a horas, conforme o solo secava.

Quando a massa do conjunto tubo-solo-sonda-tela tornou-se aproximadamente constante, a secagem das amostras passou a ser forçada, inicialmente em uma estufa aberta

Figura 7. Coleta e preparação das amostras para calibração do TDR. A) Coleta de amostras em campo; B) Fechamento do fundo do tubo com uma tela de nylon; C) Disposição das amostras já prontas; D) Conjuntos tubo-solo-sonda-tela, mergulhados em água.



Fonte: Autor, 2014

construída numa estrutura de tubos de PVC, papel alumínio e quatro lâmpadas de 200 W (Figura 8C e D) e depois em estufa fechada de secagem de material, a uma temperatura de até 90° C. Nota-se que não há um intervalo padrão para a observação da umidade, pois conforme o solo seca, a água torna-se cada vez mais aderida às partículas. Deve-se, porém, ter um cuidado para que não haja grandes “espaços” no decréscimo da umidade entre os pontos de observação.

A umidade à base de volume pelo método gravimétrico (θ_g) foi obtida utilizando a Equação 5. Os valores de umidade à base do volume apresentados pelo TDR foram convertidos em K_a utilizando-se a Equação 4 que estava originalmente programada no equipamento. A partir desses dados, foi possível relacionar θ_g e K_a para camada de solo em intervalos de 0,1 m, utilizando o software Microcal Origin®.

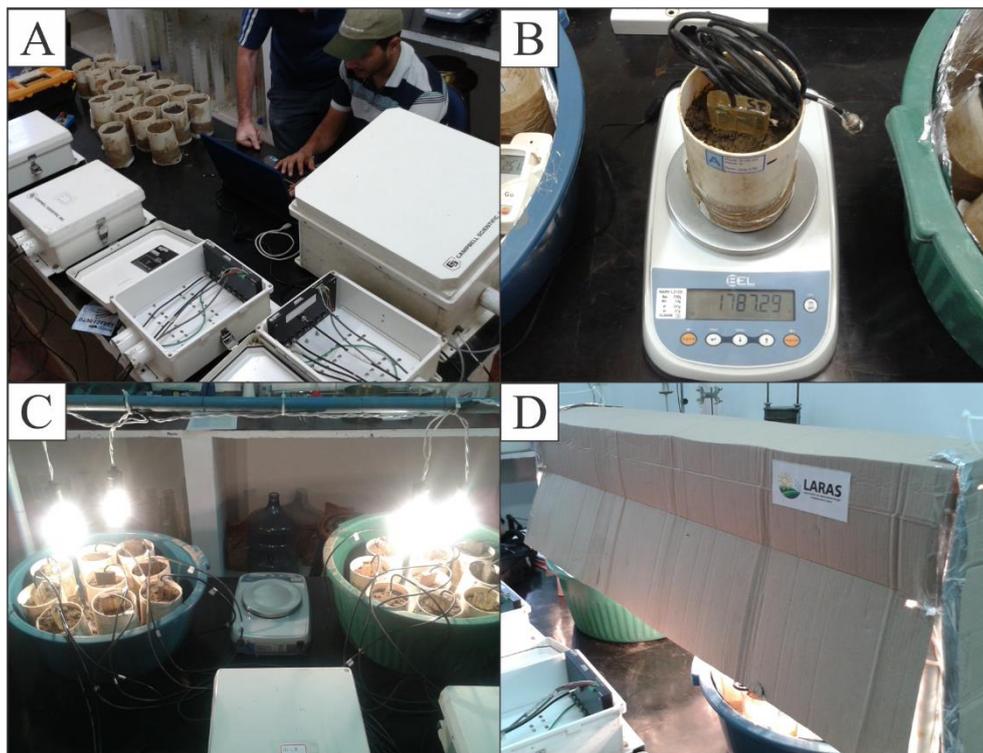
$$\theta = \frac{m_u - m_s}{V_T} \quad (5)$$

Em que m_u é a massa do solo úmido, m_s é a massa do solo seco e V_T o volume da amostra. Para verificar o grau de saturação das amostras (S) após a imersão em água, utilizou-se a Equação 6:

$$S = \frac{\theta}{\alpha} 100 \quad (6)$$

Em que S é o grau de saturação (%), θ a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e α a porosidade total do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Figura 8 – Calibração do TDR. A) Leitura dos dados de umidade do TDR; B) Processo de secagem forçada com lâmpadas incandescentes; C) Pesagem do conjunto tubo-solo-sonda-tela em balança analítica; D) Estufa de secagem adaptada com lâmpadas incandescentes



Fonte: Autor, 2014

Como a calibração do TDR foi feita após o experimento, todo o banco de dados que estava no formato de umidade volumétrica foi convertido em constante dielétrica aparente, utilizando-se para isto a Equação 4. Então, esses valores de K_a foram convertidos novamente

em umidade volumétrica através das equações calibradas localmente. Com o objetivo de obter uma equação geral que representasse todo o perfil, ou pelo menos, intervalos mais abrangentes no perfil do solo que aqueles específicos de cada camada, foram feitas médias de θ_g e K_a das camadas com espessura de 0,1 m a cada 0,3 m e depois de todas as camadas de 0,1 m para o perfil inteiro até 0,9 m. Depois, as equações médias foram comparadas com as equações individuais para testar sua viabilidade.

3.3.- Variáveis ambientais

Os valores de temperatura do ar, velocidade do ar, umidade relativa do ar, precipitação e irradiância solar global (R_g) foram obtidos de uma estação agrometeorológica automática localizada ao lado do experimento. A evapotranspiração foi estimada segundo a metodologia proposta no boletim FAO 56. Para se determinar a evapotranspiração de referência (ET_0) em escala diária foi utilizado o método de PENMAN-MONTEITH FAO (ALLEN et al., 1998), conforme Equação 7:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (7)$$

em que Rn é o saldo de radiação na superfície da cultura ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), G é a densidade de fluxo de calor no solo ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), T é a temperatura do ar a 2 m de altura do solo ($^{\circ}C$), u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura do solo ($m\ s^{-1}$), e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa), e_a é a pressão real de vapor (kPa), Δ é o fator de depleção da curva de pressão de vapor ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$). A Rn foi determinada multiplicando-se a R_g por um fator definido experimentalmente (0,572) (FERREIRA JUNIOR, 2010).

A evapotranspiração da cultura (ET_c) em condições padrão foi obtida através do método do K_c dual (ALLEN et al., 1998), que particiona a transpiração das plantas com o componente K_{cb} e a evaporação a partir do solo, com o componente K_e , através da seguinte equação:

$$ET_c = ET_0 (K_{cb} + K_e) \quad (8)$$

Os valores de K_{cb} estão no boletim FAO 56 e foram 0,15 para a fase inicial, 1,20 para a fase intermediária e 0,70 para a fase final. Para o cálculo da evapotranspiração real (ETR), leva-se

em conta o K_c ajustado, onde entra o K_s , que é um fator de depleção na transpiração influenciado pela depleção no conteúdo de água na zona radicular.

$$ETR = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (9)$$

Maiores detalhes a respeito das determinações de evapotranspiração constam no boletim FAO 56 e nos trabalhos de ARAÚJO NETO (2013) e MEDEIROS (2009).

Os graus dia acumulados foram calculados utilizando a temperatura base de 10 °C para o dossel e 16 °C para a fenologia da parte aérea, segundo a expressão.

$$GDA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_x + T_n}{2} \right) - T_b \quad (10)$$

Onde T_x é a temperatura máxima (°C), T_n a temperatura mínima (°C), T_b a temperatura base (°C) e n o número de dias observados.

3.4- Variáveis da cultura

A frequência de observação dos dados biométricos foi mensal. Foram escolhidas aleatoriamente 10 plantas que foram marcadas e avaliadas. A altura da planta, em centímetros, foi medida desde o solo até o dossel, considerado como a altura máxima da folha +1 em condições normais, o número de folhas viáveis foi contado a partir da folha +1. O sistema de numeração das folhas considera como +1 a primeira folha de cima para baixo da planta que tem sua aurícula e lígula visíveis. Tomando-a como referência, as folhas que estiverem abaixo dela recebem numeração crescente e as que estiverem acima, decrescente (VAN DILLEWIJN, 1952). Para o número de plantas por metro foi feita a contagem de perfilhos em seguimentos de 3 m de comprimento em linhas escolhidas aleatoriamente. O comprimento do colmo foi medido desde o solo até o último entrenó visível. Para estimar a área foliar, foram feitas medidas de comprimento (C) e largura (L) da folha + 3, como recomendado por HERMAN E CÂMARA (1999) na Equação 9, onde AF é a área foliar do colmo, FF é o fator de forma, N é o número de folhas totalmente, e 2 o fator de correção.

$$AF = (C * L * FF)(N + 2) \quad (11)$$

O fator de forma utilizado para a determinação da área foliar foi o determinado por FERREIRA JÚNIOR (2013) que foi de 0,65, com o ajuste tendo um coeficiente de determinação (R^2) de 0,96.

O índice de área foliar (IAF) foi então determinado pela Equação 12, em que AF é a área foliar média das plantas observadas, NPM é o número de plantas por metro e AC é a área ocupada por essas plantas (1 m^2), visto que o espaçamento entre linhas foi de 1 m.

$$IAF = \frac{AF * NPM}{AC} \quad (12)$$

O IAF foi então ajustado aos graus dia acumulados (GDA) ($T_b=10 \text{ }^\circ\text{C}$) por meio da seguinte equação (FERREIRA JÚNIOR, 2013):

$$y = w_1 \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln(\frac{x}{w_2})}{w_3} \right)^2 \right] \quad (13)$$

em que w_1 é a amplitude de y (IAF), w_2 é o valor de x (GDA) onde o IAF é máximo e w_3 é o decaimento do IAF. A relação entre IAF e GDA foi utilizada para estimar a fração de cobertura do solo, que segundo ADAMS E ARKINS (1977), é considerada como sendo igual à fração da radiação fotossintética interceptada (FI), conforme a Equação 12:

$$CS = 1 - e^{(-kIAF)} \quad (13)$$

em que CS é a cobertura do solo, FI a fração de radiação fotossintética interceptada, k é o coeficiente de extinção de luz que fora determinado por FERREIRA JÚNIOR (2013) no valor de 0,48.

A altura da planta e o comprimento do colmo foram ajustados aos graus dia acumulados ($T_b=16 \text{ }^\circ\text{C}$) utilizando o modelo de Boltzmann (Eq. 13) e o número de plantas por metro quadrado foi ajustado aos GDA através de uma regressão linear.

$$y = \frac{A1+A2}{1+e^{(x-X_0)/dx}} + A2 \quad (13)$$

em que A1 é o valor inicial de y e A2 o valor final, x são os GDA, X₀ é o valor de GDA que corresponde ao valor médio de y (ponto de inflexão) e dx é o coeficiente de ajuste, representando o incremento a y em função do aumento de x.

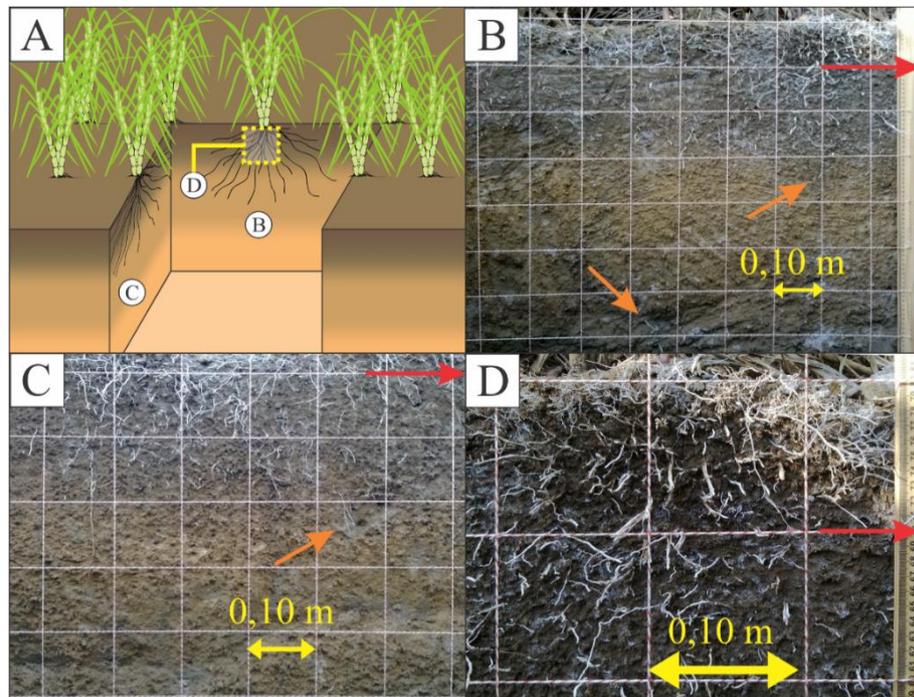
A determinação das fases fenológicas seguiu a metodologia do boletim FAO 56, que considera quatro estágios fenológicos, medidos a partir da cobertura do solo e são definidos como se segue: 1- fase inicial (56 dias), cobertura do solo até 10%; 2- fase de desenvolvimento (119 dias), cobertura do solo entre 10% e 80%; 3- fase intermediária (62 dias), cobertura do solo entre 80% e o máximo de cobertura alcançado; 4- fase final (185 dias), se inicia a partir da diminuição da cobertura do solo e segue até o final do cultivo.

A medida da profundidade máxima do sistema radicular para a determinação da capacidade de água disponível (CAD) do solo foi feita quando a cana estava na terceira fase fenológica, considerando-se que nessa fase a cana alcança seu máximo desenvolvimento radicular. A rizometria consistiu na abertura de uma trincheira (Figura 9A) que abrangesse lateral e transversalmente uma linha.

Mantendo-se uma camada de solo com espessura de 0,1 m entre a parede da trincheira e o eixo do colmo da planta, a parede da trincheira foi “escovada” utilizando-se um rolo de madeira cravado por pregos para que a raiz se soltasse do solo sem ser danificada. Após esse procedimento, a raiz foi então borrifada com tinta branca, para se destacar do solo e a parede da trincheira, foi então novamente escovada, para que o solo que recebera também uma camada de tinta se desprendesse, ficando apenas a raiz pintada de branco exposta. Duas régua de madeira com 1 m de comprimento e barbantes foram utilizadas para compor uma grade referencial, formando quadrados de 0,1 m de lado (Figura 9 BCD).

Ao final do experimento, foi feita a medida da produtividade de cana em toneladas de colmos por hectare (TCH). Escolheram-se 3 fileiras, respeitando-se a bordadura, para se cortar em cada uma delas, 10 m² de cana. Os colmos foram então organizados em feixes contendo uma média de 20 colmos, e então foram pesados com uma balança digital com capacidade de 100 kg. A média das amostragens foi então extrapolada para um hectare.

Figura 9. Rizometria em trincheira de 1,0 m de profundidade. A) Diagrama de localização dos planos da trincheira; B) Plano ‘B’ indicado no diagrama ‘A’ mostrando até 0,7 m de profundidade; C) Plano ‘C’ indicado no diagrama ‘A’, mostrando até 0,6 m de profundidade; D) Detalhe ‘D’ do plano ‘B’ indicado no diagrama ‘A’, mostrando os primeiros 0,2 m do sistema radicular.



Nota: Setas vermelhas indicam a profundidade de 0,1 m a partir da superfície do solo, setas laranja indicam a máxima profundidade com raiz encontrada.

Fonte: Autor, 2014

3.5- Disponibilidade de água no solo segundo o método FAO 56

O armazenamento de água no solo foi simulado através da planilha proposta pelo boletim FAO 56, que considera a capacidade de água disponível (CAD) dada em milímetros (mm) como o intervalo entre os valores de capacidade de campo e ponto de murcha medidos, segundo a equação:

$$CAD = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PM})Z_r \quad (14)$$

Em que θ_{CC} ($m^3 m^{-3}$) é o valor médio da umidade volumétrica na capacidade de campo, a um potencial de -10 kPa, θ_{PM} ($m^3 m^{-3}$) é o valor da umidade volumétrica do solo no ponto de

murcha, a um potencial de -1500 kPa e Zr é a profundidade máxima do sistema radicular, em metros.

Embora a CAD (mm) seja considerada a água disponível total para as culturas, para suprir a demanda evapotranspirativa da atmosfera a água tem que ser prontamente disponível para o sistema radicular, uma vez que conforme a quantidade de água diminui, o potencial matricial aumenta, retendo com mais força a água no solo. Dessa forma, há o conceito de água facilmente disponível (AFD), que para a cana, segundo o boletim FAO, corresponde a 65% da CAD.

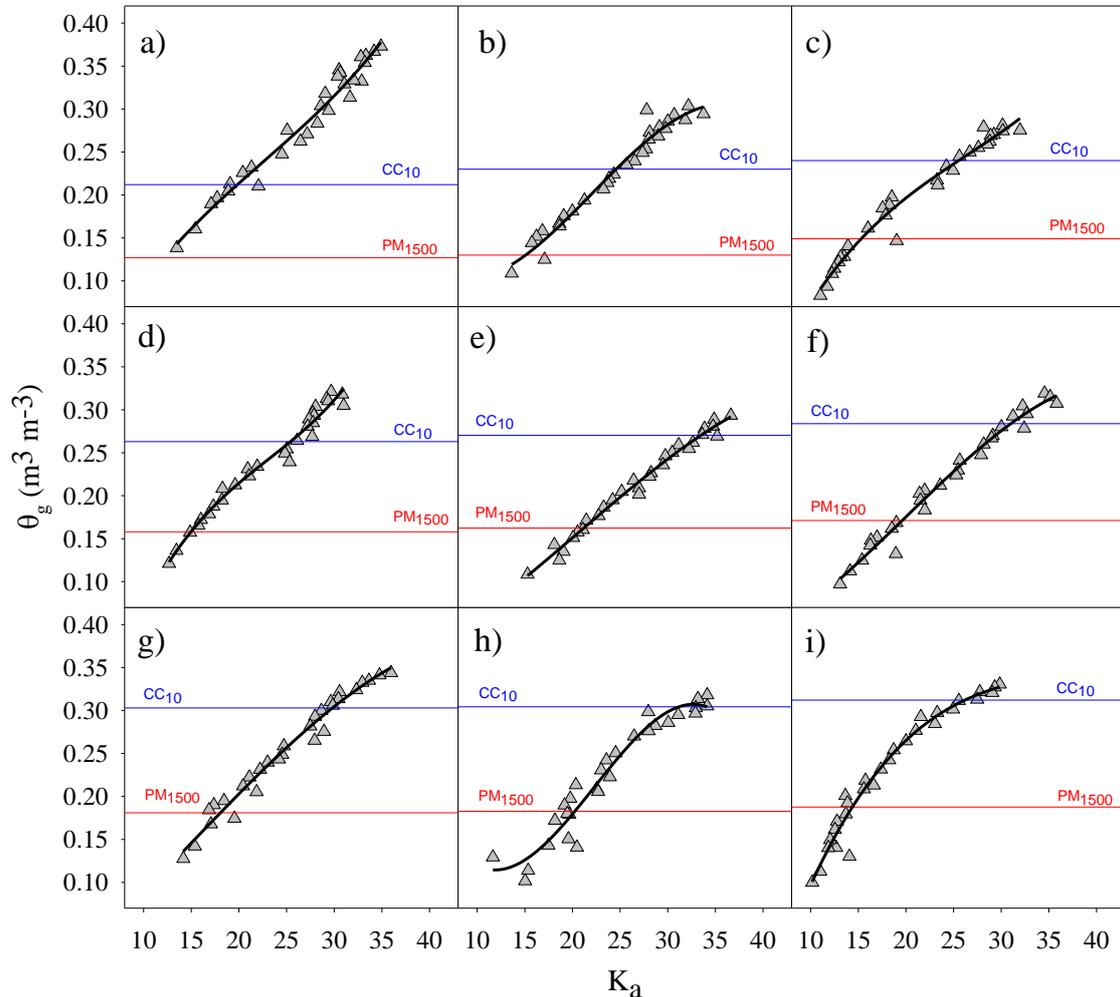
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Calibração do TDR

A Figura 10 mostra as curvas de calibração que relacionam a umidade gravimétrica medida para a calibração (θ_g) com a constante dielétrica aparente do solo (K_a), obtida pelo TDR no mesmo instante. Na Tabela 4, constam os coeficientes das equações de ajuste polinomiais do terceiro grau, como proposto por TOPP, DAVIS e ANNAN (1980), e seus coeficientes de determinação (R^2). A equação que representa a camada de 0 a 0,1 m (Figura 10a, Tabela 4) apresentou um ajuste, indicado pelo R^2 , de 0,967, foi obtida com valores de θ_g entre $0,138 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,372 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo que o valor máximo de θ_g , medido logo após o processo de imersão em água das amostras, correspondeu a 79,39% da saturação. Esse intervalo cobre a capacidade de campo, determinada no Laboratório de Solo, Água e Planta da UFAL e interpolada para as camadas com 0,1 m de espessura (Tabela 3), que foi de $0,212 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Embora o menor valor de θ_g esteve acima do ponto de murcha, que para essa camada fora $0,127 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Para a camada de 0,1-0,2 m (Figura 10b, Tabela 3), o θ_g variou entre $0,108$ e $0,303 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, onde seu valor máximo correspondeu a 66,82% da saturação. Dentro desse intervalo, estão os valores de CC ($0,212 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e PM ($0,138 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Na camada de 0,2-0,3 m (Figura 10c, Tabela 4), a equação de calibração foi determinada a partir de valores de θ_g variando entre $0,082$ a $0,281 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ com seu valor máximo apresentando grau de saturação de 65,47%. A umidade na capacidade de campo ($0,247 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e no ponto de murcha ($0,149 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) estão no intervalo da equação. A camada de 0,3-0,4 m (Figura 10d, Tabela 3) apresentou θ_g variando entre $0,120 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,321 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a equação de calibração, seu valor máximo correspondeu a 78,30% da saturação. Valores de CC ($0,263 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e PM ($0,158 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) estão contidos nesse intervalo. A equação da camada 0,4-0,5 m (Figura 10e, Tabela 4) apresentou um ajuste pelo R^2 de 0,985, foi obtida através de valores de θ_g entre $0,109$ e $0,299 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com seu valor máximo apresentando um grau de saturação de 74,13%, contendo nesse intervalo a capacidade de campo ($0,276 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e o ponto de murcha ($0,165 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Na camada de 0,5-0,6 m (Figura 10f, Tabela 4) a equação de calibração foi obtida a partir de valores de θ_g num intervalo entre $0,097 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,326 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o grau de saturação máximo após a imersão das amostras foi de 82,02%, valores de CC ($0,290 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e PM ($0,174 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) estão incluídos no intervalo da equação.

Figura 10. Curvas de calibração do TDR relacionando umidade volumétrica (θ_g) e constante dielétrica aparente (K_a) para cada camada do solo abrangida por uma sonda: a) 0-0,10 m; b) 0,10-0,20 m; c) 0,20-0,30 m; d) 0,30-0,40 m; e) 0,40-0,50 m; f) 0,50-0,60 m; g) 0,60-0,70 m; h) 0,70-0,80 m; i) 0,80-0,90 m.



Fonte: Autor, 2014

A equação de calibração para a camada de 0,6-0,7 m (Figura 10g, Tabela 4) foi obtida a partir de valores de θ_g que estão no intervalo entre $0,127 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,343 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, com seu valor máximo apresentando grau de saturação de 87,16%. Esse intervalo abrange capacidade de campo ($0,303 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e ponto de murcha ($0,181 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A umidade volumétrica medida na camada de 0,7-0,8 m (Figura 10h, Tabela 4) perfez o intervalo de umidade do solo de $0,102$ a $0,325 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, incluindo os valores médios interpolados de PM e CC ($0,181$ e $0,302 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Para essa camada, o grau de saturação de θ_g máximo foi de 81,56%, assemelhando-se ao grau de saturação da capacidade de campo para essa camada, que foi de 78,14%. Para a equação de 0,8-0,9 m (Figura 10i, Tabela 4) utilizou-se uma série de dados de θ_g num intervalo entre $0,100$ a $0,337 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o valor máximo de θ_g correspondeu a 83,35% da saturação e os valores de CC

(0,319 m³ m⁻³) e PM (0,191 m³ m⁻³) estiveram dentro desse intervalo. Esses resultados são consoantes com as equações de calibração, determinadas por TOMMASELLI E BACCHI (2001), que foram consideradas válidas para estimativa de umidade no intervalo entre 0,100 e 0,400 m³ m⁻³, para cinco tipos de solos na região de Piracicaba-SP.

Tabela 4. Coeficientes das equações polinomiais do terceiro grau, do tipo $y = y_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3$, onde y é a umidade volumétrica e x a constante dielétrica aparente do solo.

Camada (m)	y ₀	β ₁	β ₂	β ₃	R ²
0-0,10	-0,093	0,246	-0,0007	9,776E-6	0,967
0,10-0,20	0,175	-0,019	0,0014	-2,045E-5	0,967
0,20-0,30	-0,164	0,032	-0,0009	1,178E-5	0,972
0,30-0,40	-0,271	0,049	-0,0018	2,548E-5	0,976
0,40-0,50	-0,003	0,004	0,0003	-4,381E-6	0,985
0,50-0,60	0,013	0,002	0,0004	-7,247E-6	0,980
0,60-0,70	-0,017	0,009	0,0002	-3,743E-6	0,973
0,70-0,80	0,386	-0,052	0,0030	-4,427E-5	0,940
0,80-0,90	-0,253	0,046	-0,0012	1,140E-5	0,988
0-0,30	-0,110	0,024	-0,0006	7,835E-6	0,988
0,30-0,60	-0,142	-0,027	-0,0007	8,732E-6	0,986
0,60-0,90	-0,130	0,023	-0,0002	-2,018E-6	0,986
0-0,90	-0,110	0,002	-0,0003	1,684E-6	0,999

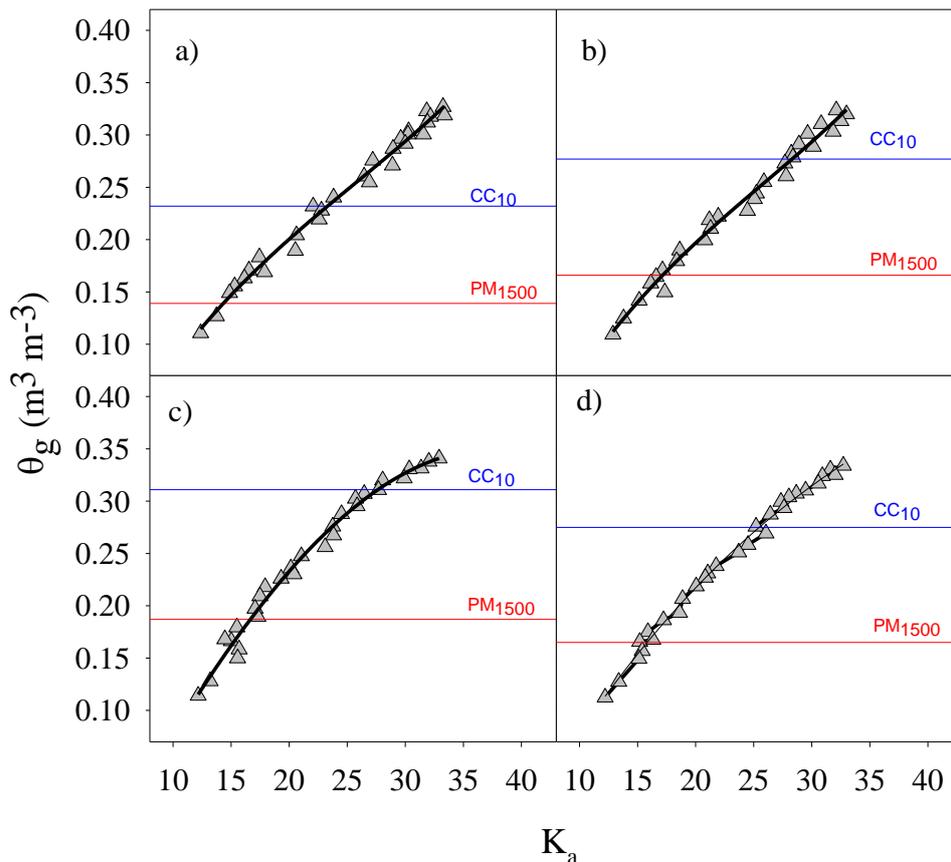
Fonte: Autor, 2014

O fato dos valores de umidade na capacidade de campo e ponto de murcha estarem dentro da amplitude de umidade gravimétrica medida nas amostras de solo indica que a equação pode estimar valores de umidade que estejam dentro do intervalo de água disponível para a cultura no campo. Atribui-se a variabilidade entre as equações ao fato do perfil do solo estudado não ser homogêneo, pois esse é um estudo de caso em campo. SILVA (2013), trabalhando com determinação da percolação em lisímetros de drenagem, encontrou curvas de calibração para solo argilo-arenoso com intervalo de umidade volumétrica nas faixas de 0,040 m³ m⁻³ a 0,375 m³ m⁻³ e para solo de areia franca, um intervalo de 0,016 m³.m⁻³ a 0,306 m³ m⁻³.

PONIZOVSKYA, CHUDINOVA E PACHEPSKY (1999), estudando diferentes modelos de relação entre constante dielétrica e umidade do solo, em sete diferentes misturas e tipos de solos, concluíram que o teor de argila exerce maior influência na constante dielétrica aparente do solo. COELHO et al. (2006) obtiveram equações de calibração locais que variaram conforme o tipo de solo.

A Figura 11 contém curvas de calibração obtidas a partir da média das umidades das amostras pelo método gravimétrico com as médias das constantes dielétricas, em intervalos de 0,3 m (Figura 11 a, b, c) e para o perfil inteiro do solo, desde a superfície a 0,9 m de profundidade (Figura 11d).

Figura 11. Curvas de calibração médias do TDR relacionando umidade volumétrica (θ_g) e constante dielétrica aparente (K_a), para camadas médias com espessura de 0,3 m e para o perfil total medido, 0,9 m: a) 0-0,30 m; b) 0,30-0,60 m; c) 0,60-0,90 m; d) 0-0,90 m



Fonte: Autor, 2014

Observa-se que para cada curva há um intervalo diferente entre os valores máximo (referente à umidade volumétrica da amostra de solo após imersão em água) e mínimo (umidade volumétrica do solo seco em estufa) do θ_g , pois cada horizonte tem características físicas texturais e de densidade do solo (D_s) distintas, o que resulta em diferentes valores para água disponível (Tabela 1 e 3). Na Figura 12 estão comparações entre estimativas de umidade obtidas com equações individuais por camada e estimativas obtidas com equações médias das camadas para uma série de dados de K_a obtidos em campo. Como explicado pelo R^2 , o ajuste para as curvas médias, de modo geral, foi melhor que o das curvas individuais, indicado pela diminuição do erro.

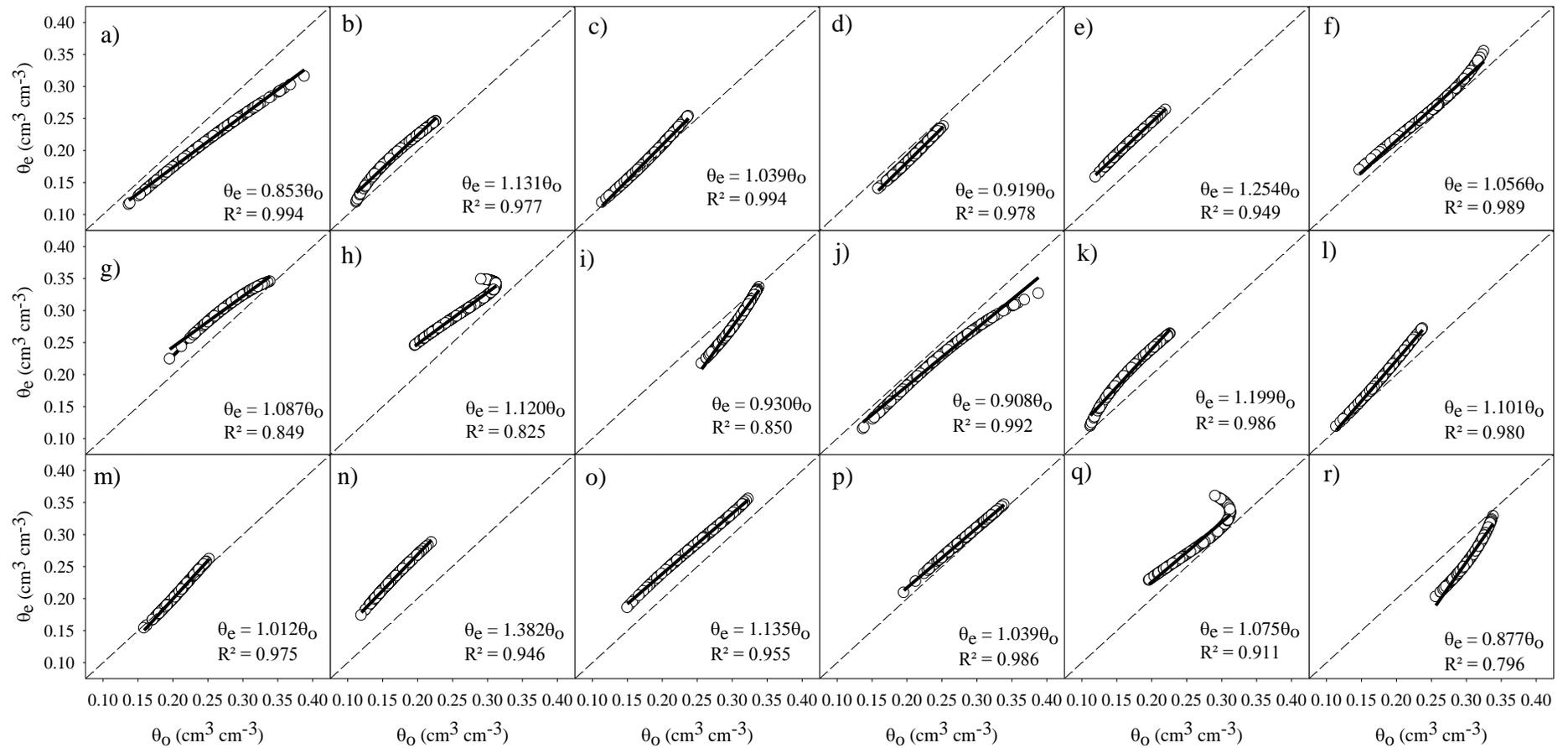
Para a equação média da camada entre 0 a 0,3 m (Figura 11 a), foram utilizados valores de θ_g médios variando entre 0,110 e 0,333 $m^3 m^{-3}$, com grau de saturação da umidade máxima de 81,97%, contendo nesse intervalo os valores de CC (0,232 $m^3 m^{-3}$) e PM (0,165 $m^3 m^{-3}$). No entanto, quando comparadas as estimativas de umidade em campo, a equação média de 0-0,3 m subestima a de 0-0,1 m em 14,7% (Figura 12 a) e superestima a de 0,1-0,2 m em 13% (Figura 12 b), podendo estimar a umidade da camada de 0,2-0,3 m, onde a diferença foi inferior a 5% (Figura 12 c). A equação média da camada de 0,3 a 0,6 (Figura 11b) m foi obtida com valores de θ_g que variaram entre 0,109 $m^3 m^{-3}$ e 0,323 $m^3 m^{-3}$, com o valor de θ_g máxima correspondendo a 83,18% da saturação do solo, valores de CC (0,275 $m^3 m^{-3}$) e PM (0,165 $m^3 m^{-3}$) foram abrangidos por esse intervalo.

Quando uma série de dados de umidade em campo estimados pela equação de 0,3-0,6 m é confrontada com aquela estimada através das equações individuais, verifica-se que as diferenças são inferiores a 5% para as equações de 0,3-0,4 m (Figura 12 d) e 0,5-0,6 m (Figura 12 f) e inferior a 10% para a equação de 0,4-0,5 m (Figura 12 e). Para a camada de 0,6 a 0,9 m (Figura 11c) foram utilizados dados de θ_g num intervalo de 0,114 a 0,340 $m^3 m^{-3}$, em que o valor máximo correspondeu a 85,24% da saturação. Valores de CC (0,311 $m^3 m^{-3}$) e PM (0,187 $m^3 m^{-3}$) estão contidos nesse intervalo. A comparação das séries de dados da equação média com as equações individuais mostra que a umidade é superestimada pela equação média quando comparada com os valores da equação 0,7-0,8 m (Figura 12 h) em 12%. Já para as equações 0,6-0,7 m (Figura 13 g) e 0,8-0,9 m (Figura 12 i) essa diferença foi inferior a 10%. TOMMASELLI E BACCHI (2001) concluíram que a curva de calibração estimada para um conjunto de dados médios para diferentes tipos de solo não foi representativa como uma equação empírica universal.

A equação geral obtida com as médias de θ_g para todas as camadas (Figura 11e) foi utilizada com série de dados de K_a em laboratório para estimar a umidade para cada camada, onde os valores de umidade médios perfizeram o intervalo entre 0,112 e 0,333 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, com o valor máximo representando um grau de saturação de 81,97%, contendo, nesse intervalo, os valores de capacidade de campo (0,275 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e ponto de murcha (0,165 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Os valores de umidade estimados pela equação geral para dados de K_a obtidos em campo confrontados com as equações individuais para cada camada de 0,1 m de espessura mostram que a mesma apresenta precisão para algumas camadas, como as de 0-0,1 m (Figura 12 j), 0,2-0,3 m (Figura 12 l), 0,7-0,8 m (Figura 12 q) com diferença menor que 10% entre os dados estimados pela equação individual e estimados pela equação geral; diferença inferior a 5% entre as estimativas da equação geral e das individuais para as camadas 0,3-0,4 m (Figura 12 m) e 0,6-0,7 m (Figura 12 p). Para as camadas 0,1-0,2 m (Figura 12 k), 0,4-0,5 m (Figura 12 n) e 0,5-0,6 m (Figura 12 o) houve uma expressiva superestimação por parte da equação geral do perfil com relação às equações individuais, da ordem de 19,9%, 38% e 13% respectivamente. Para a camada de 0,8-0,9 m houve uma subestimação de aproximadamente 12%. CECÍLIO E SANTOS (2009) encontraram para um Latossolo Vermelho Amarelo de densidade 1 Mg m^{-3} , equação com coeficiente de determinação de 0,98 e intervalos de umidade entre 0,213 e 0,477 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

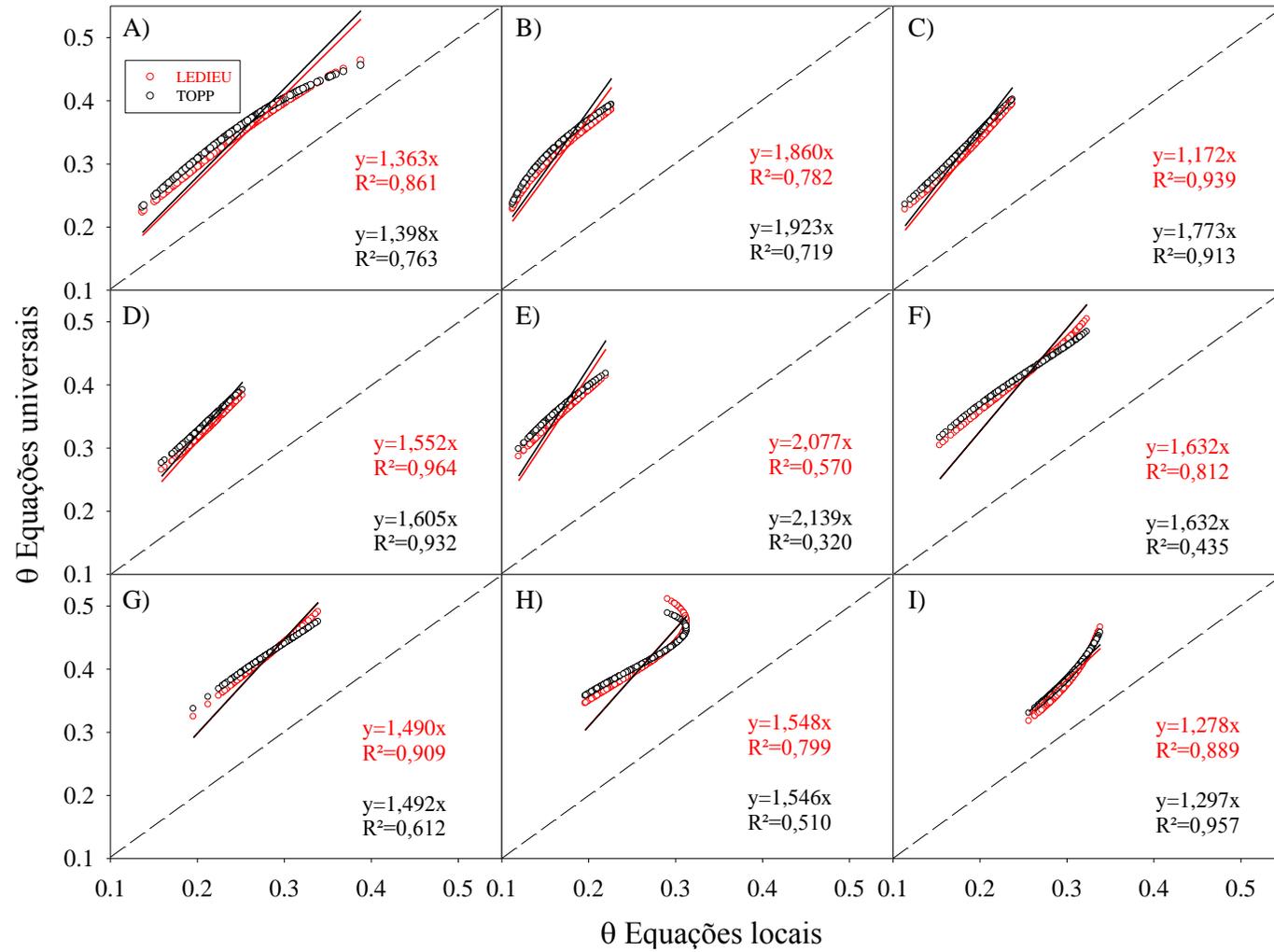
Por fim, as equações calibradas localmente foram comparadas com as equações empíricas universais determinada por LEDIEU et al (1986) e por TOPP, DAVIS E ANNAN (1980). As séries comparadas encontram-se na Figura 13, ajustadas por regressões lineares forçadas a passar pela origem, todos os coeficientes das equações lineares foram significativos ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t. As estimativas de umidade obtidas através das equações empíricas são parecidas. Quando comparadas com as equações calibradas localmente, houve uma superestimação por parte das universais. A maior diferença foi para a camada de 0,4-0,5 m, onde os resultados da série de dados estimados pelas equações locais forma superestimados pela equação de Ledieu em 107% e pela equação de Topp em 113%, com o coeficiente de determinação R^2 de 0,57 e 0,32 para Ledieu e Topp respectivamente. A menor diferença entre as equações universais e calibradas foi para a camada de 0,8-0,9 m, com a equação de Ledieu superestimando em 27,85% as locais, com um R^2 de 0,88, e a equação de Topp superestimando em 29,72% as locais, com um R^2 de 0,95. Essa última foi a que teve o melhor ajuste indicado pelo coeficiente de determinação.

Figura 12. Comparação entre equações de calibração do TDR de cada camada individual (θ_o) com as equações médias das camadas agrupadas (θ_e) para uma série de dados de Ka medidos em campo: a) Equação 0-0,1 m x 0-0,3 m; b) Equação 0,1-0,2 m x 0-0,3 m; c) Equação 0,2-0,3 m x 0-0,3 m; d) Equação 0,3-0,4 m x 0,3-0,6 m; e) Equação 0,4-0,5 m x 0,3-0,6 m; f) Equação 0,5-0,6 m x 0,3-0,6 m; g) Equação 0,6-0,7 m x 0,6-0,9 m; h) Equação 0,7-0,8 m x 0,6-0,9 m; i) Equação 0,8-0,9 m x 0,6-0,9 m; j) Equação 0-0,1 m x 0-0,9 m; k) Equação 0,1-0,2 m x 0-0,9 m; l) Equação 0,2-0,3 m x 0-0,9 m; m) Equação 0,3-0,4 m x 0-0,9 m; n) Equação 0,4-0,5 m x 0-0,9 m; o) Equação 0,5-0,6 m x 0-0,9 m; p) Equação 0,6-0,7 m 0-0,9 m; q) Equação 0,7-0,8 m x 0-0,9 m; r) Equação 0,8-0,9 m x 0-0,9 m.



Fonte: Autor, 2014

Figura 13. Comparação entre equações de calibração do TDR locais com as equações universais de LEDIEU et al (1986) e TOPP, DAVIS e ANNAN (1980).



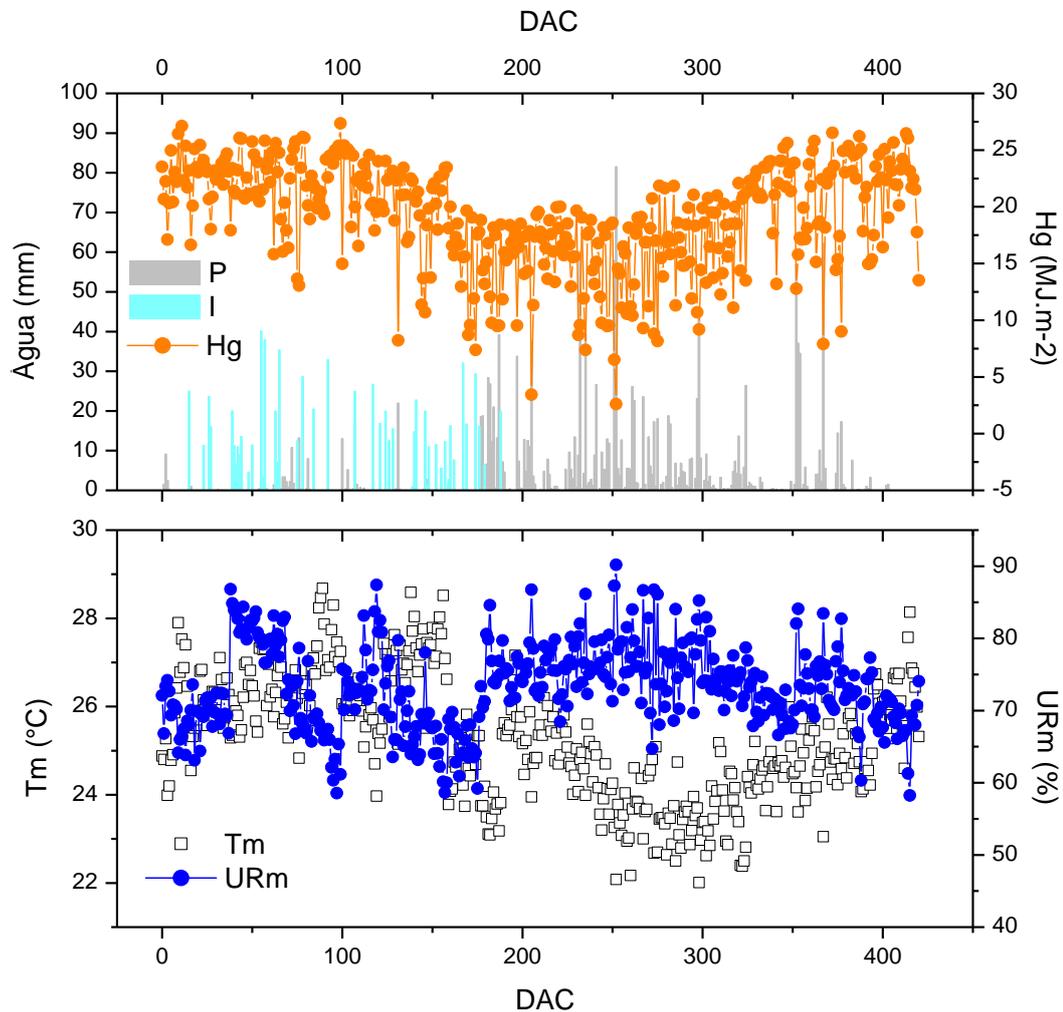
Fonte: Autor, 2014

Para as comparações entre a equação de Ledieu e as locais, o ajuste pelo coeficiente de determinação não passou de 0,9395, o que ocorreu para a camada de 0,2-0,3 m. Em média, estimar a umidade do perfil através do TDR utilizando a equação universal de Ledieu superestima em 60,88% as estimativas calibradas localmente e utilização da equação de Topp a superestima em 64% as locais. TOMMASELLI E BACCHI (2001) concluíram que a equação de Topp não foi indicada para estimar a umidade dos solos estudados em Piracicaba-SP.

4.2. Condições meteorológicas durante o cultivo

Na Figura 14 estão os principais elementos meteorológicos e a irrigação em escala diária, que são: precipitação e irrigação, irradiação solar global, temperatura média e umidade relativa média. Na Tabela 4 um resumo das temperaturas máxima, mínima e média, da umidade relativa média e irradiação solar global média, tanto para o ciclo como por cada fase fenológica. É importante observar que há efeito de sazonalidade entre os valores observados para cada fase fenológica, visto que a cultura alcançou um ciclo de 422 dias. A temperatura é um dos principais fatores que influenciam no desenvolvimento da cana-de-açúcar, tendo variado durante todo o ciclo no intervalo entre a mínima de 17,96 e máxima de 34,14 °C com uma média para todo o ciclo de 25,27 °C (Tabela 5). Para a fase inicial (entre o dia do corte e 57 DAC) e de crescimento (entre 58 e 177 DAC) a temperatura média ficou na casa dos 26 °C, para a fase intermediária (entre 178 e 237 DAC) e final (entre 238 e 420 DAC) as temperaturas médias variaram na casa dos 24 °C. A umidade relativa média para todo o ciclo foi de 73,14%, com mínima de 70,32% e máxima de 75,89% (Tabela 6). Na fase 1, a umidade relativa média foi de 73,68%, para a fase 2 foi de 70,32%, para a fase 3 foi 75,89% e para a fase 4, 73,87%. A precipitação total para o ciclo foi de 1623,16 mm, sendo que desse total, 77,45% esteve concentrado entre os meses de abril a agosto de 2013 (SOUZA et al, 2004). Para a fase inicial, a soma da precipitação foi de 15,66 mm e para a fase de desenvolvimento foi de 127,8 mm. Nessas duas fases 94,4% da irrigação total, que foi de 766,9 mm, foi aplicada para suprir a demanda evapotranspirativa da cultura. A soma da precipitação para a fase intermediária foi de 511,96 mm e mais 42,61 mm de irrigação. A fase final recebeu 967,74 mm de precipitação.

Figura 14. Elementos meteorológicos diários e irrigação aplicada durante o ciclo da cultura. Irradiância solar global média (Hg), precipitação (P), irrigação (I), temperatura média (Tm), umidade relativa média (URm).



Fonte: Autor, 2014

Tabela 5. Duração das fases fenológicas, temperaturas máxima (Tx), mínima (Tn) e média (Tm), umidade relativa média (URm%) e irradiação solar global média (Hg) para cana irrigada.

Fase	Dias	Tx (°C)	Tn (°C)	Tm (°C)	URm (%)	Hg (MJ m ⁻²)
1	56	33,65	19,67	26,06	73,68	22,54
2	119	34,14	20,65	26,40	70,32	20,36
3	62	31,26	20,24	24,94	75,89	15,48
4	85	33,88	17,96	24,50	73,87	18,62
Ciclo	422	34,14	17,96	25,27	73,14	19,18

Fonte: Autor, 2014

Tabela 6. Duração das fases fenológicas, precipitação (P), irrigação (I), evapotranspiração de referência (ET_o), coeficiente da cultura (K_c), evapotranspiração da cultura (ET_c) para a cultura da cana irrigada.

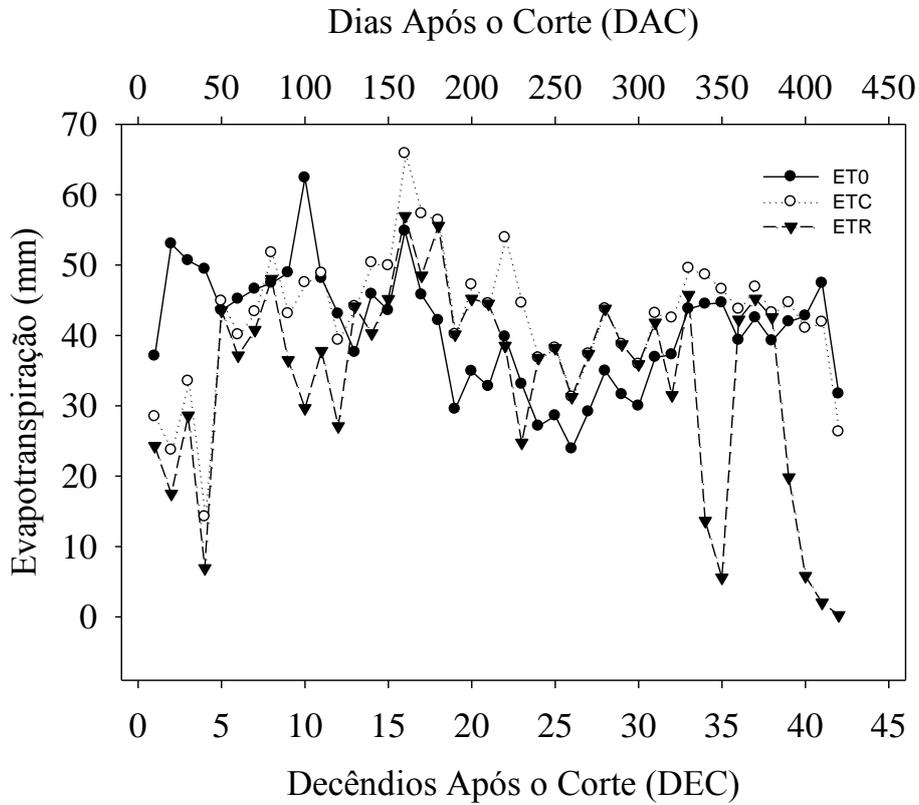
Fase	Dias	P (mm)	I (mm)	ET_o (mm)	K_c	ET_c (mm)
1	56	15,66	203,60	274,10	0,68	179,44
2	119	127,8	520,69	563,75	1,08	593,57
3	62	511,96	42,61	204,12	1,36	276,65
4	85	967,74	-	669,83	1,13	743,17
Ciclo	422	1623,16	766,90	1711,80		1792,83

Fonte: Autor, 2014

A Figura 15 mostra a variação na evapotranspiração de referência, evapotranspiração da cultura pelo método FAO K_c dual e a evapotranspiração real pelo método FAO K_c ajustado em escala decendial. A evapotranspiração de referência para o ciclo foi de 1711,80 mm, sendo de um total de 274,10 mm para a fase 1, 563,75 mm para a fase 2, 204,12 mm para a fase 3 e 669,83 mm para a fase 4. A evapotranspiração da cultura foi de 1792,83 para o ciclo da cana. Para a fase 1, a ET_c foi de 179,44 mm, para a fase 2, 593,57 mm, para a fase 3, 276,65 mm e para a fase 4 foi 743,17 mm. A Figura 16 mostra que a evapotranspiração real sofreu uma queda significativa no final da fase 4. Essa informação será confrontada nos resultados de armazenamento de água no solo mais à frente.

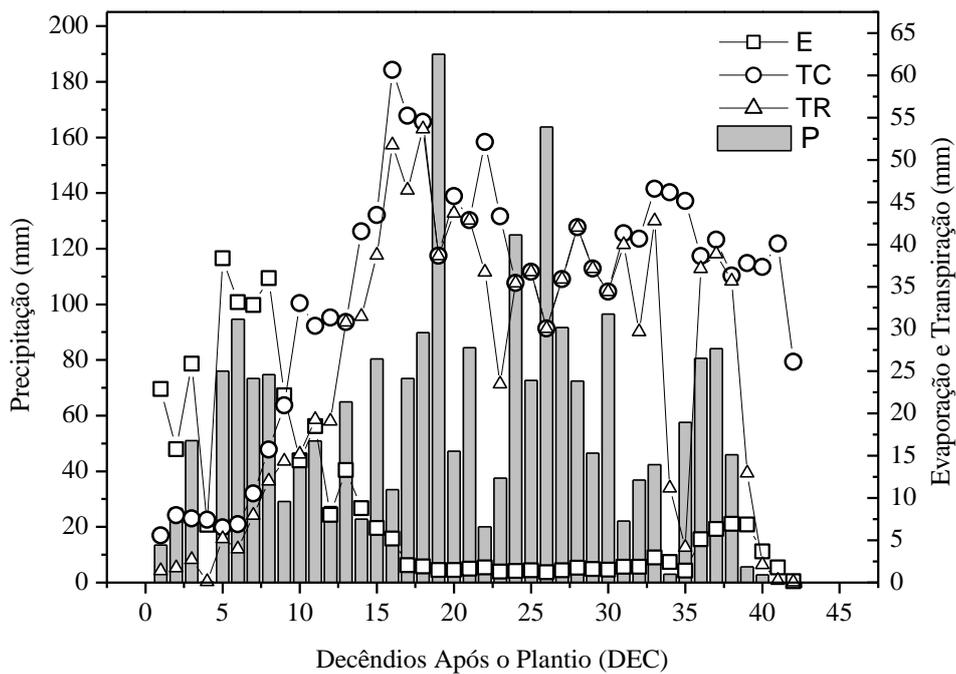
Nas Figura 16, a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração real foram particionadas em evaporação e transpiração. É notável uma redução da evaporação com o fechamento do dossel, com um leve aumento na fase 4, considerando a senescência do dossel. A transpiração da cultura segue a tendência da variação da precipitação enquanto que a transpiração real é fortemente influenciada por períodos secos. Esse aspecto de variação na transpiração, apresentando déficit hídrico nos períodos secos, não foi evidenciado pelas medidas de umidade do solo por TDR. Isso é atribuído à heterogeneidade do perfil do solo, há uma maior fração de argila nas camadas com mais de 0,4 metro de profundidade, ocorrendo a partir daí, um horizonte coeso cujos efeitos serão discutidos ainda nesse trabalho.

Figura 15. Evapotranspiração de referência (ET₀) pelo método de PENMAN-MONTEITH FAO, evapotranspiração da cultura (ETC) e evapotranspiração real, pelo método FAO em escala decendial durante o ciclo da cultura.



Fonte: Autor, 2014

Figura 16. Evaporação (E), transpiração da cultura (TC), transpiração real da cultura (TR) e precipitação (P) em escala decendial.

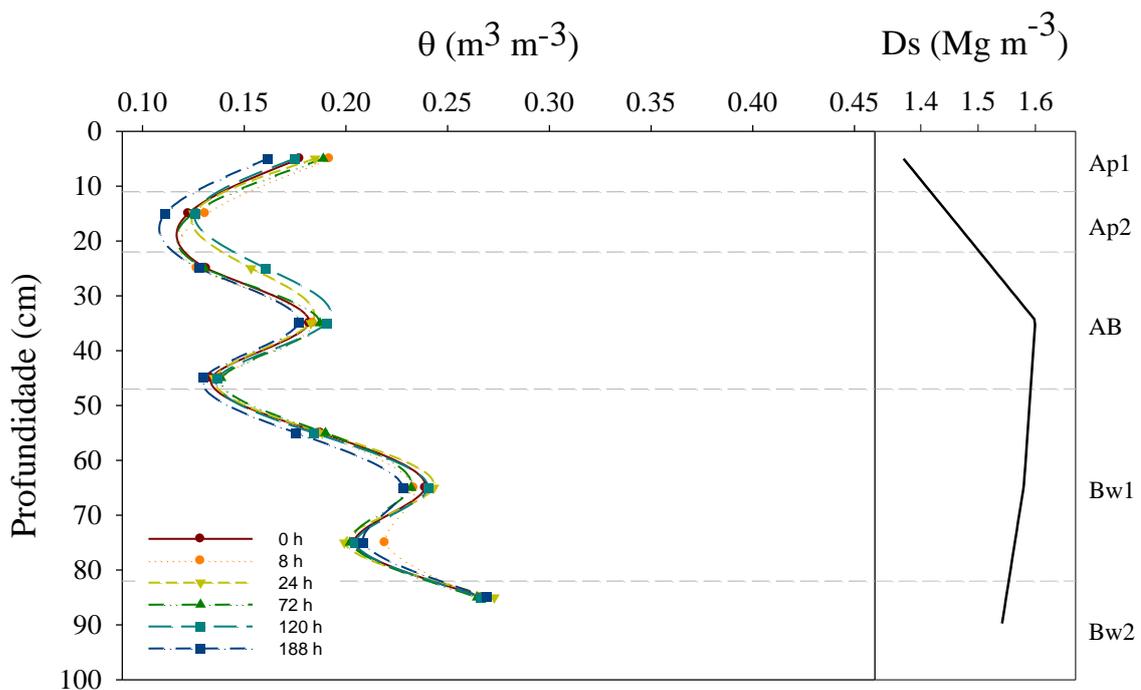


Fonte: Autor, 2014

4.3- Distribuição de água no perfil do solo

A Figura 17 apresenta a distribuição de água no perfil do solo para um período de 12 dias no começo da fase fenológica inicial da cultura, em tempos diferentes após um evento de chuva de 9,14 mm, medida através do TDR calibrado localmente. Nessa fase, estando a cultura ainda estabelecendo seu novo sistema radicular, a maior perda de água é pela evaporação direta da superfície do solo para a atmosfera, o que pode ser observado a partir da variação nos primeiros 0,2 m do perfil entre o evento de precipitação e 188 horas após esse. VAN BAVEL (1968a) também encontrou que a evaporação superficial abrange os primeiros 20 cm do solo. Pode-se observar que há uma tendência de aumento do conteúdo de água conforme a profundidade aumenta até os 0,35 m. Paralelamente, há um aumento na densidade do solo até este ponto, o que pode justificar a variação na umidade. O aumento na umidade poderia ser explicado por drenagem dos horizontes AP1 e AP2 para o AB se essa estivesse bem definida. O período retratado nessa figura sucedeu uma época seca em que também não houve irrigação (a irrigação teve início aos 14 dias após o corte), portanto, a quantidade de água presente no solo permaneceu próxima ao ponto de murcha do perfil ($0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o que resulta numa pouca ou nenhuma redistribuição hídrica ao longo do perfil.

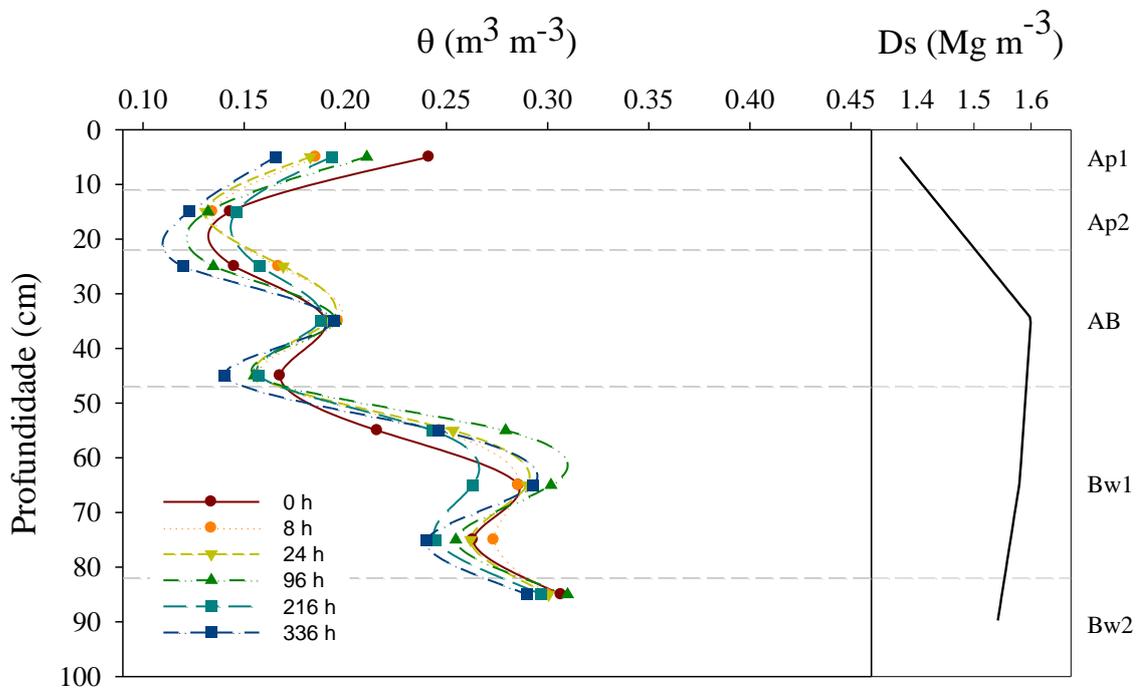
Figura 17. Perfil de redistribuição de água no solo após um evento de chuva de 9,14 mm na fase fenológica inicial



Fonte: Autor, 2014

A Figura 18 mostra a distribuição hídrica no perfil do solo para um período de 14 dias, após um evento de irrigação de 32,96 mm, dentro da fase fenológica intermediária. Após a irrigação até o décimo quarto dia, não houve nenhuma precipitação ou outra irrigação. É possível notar agora que há uma maior dinâmica no processo de redistribuição de água no perfil do solo, pois a cultura já vem recebendo irrigação. A maior variação de perda de água ocorre nos 0,2 m iniciais. Pode-se afirmar que parte dessa variação deve-se à evaporação direta da superfície do solo enquanto há concomitante transpiração da cultura. Até 0,1 m de profundidade no momento 0 h após a irrigação, a umidade é aproximadamente $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, após 336 horas cai para aproximadamente $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Já na camada de 0,2 a 0,3 m a umidade que no instante 0 hora após a irrigação era de $0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ passa a $0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ após 8 horas e se mantém até 24 horas depois da irrigação, passando então a diminuir progressivamente com o passar do tempo chegando a $0,11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ após 336 horas da irrigação. Na camada 0,3 a 0,4 m nota-se que a umidade não mudou, nessa profundidade a densidade do solo é máxima. No horizonte BW1, mais precisamente na camada 0,5-0,6 m, há um aumento na quantidade de água após o evento de irrigação, a porcentagem de argila para esse horizonte é a maior (54%). Essa variação abaixo das camadas superiores do perfil evidencia que houve drenagem.

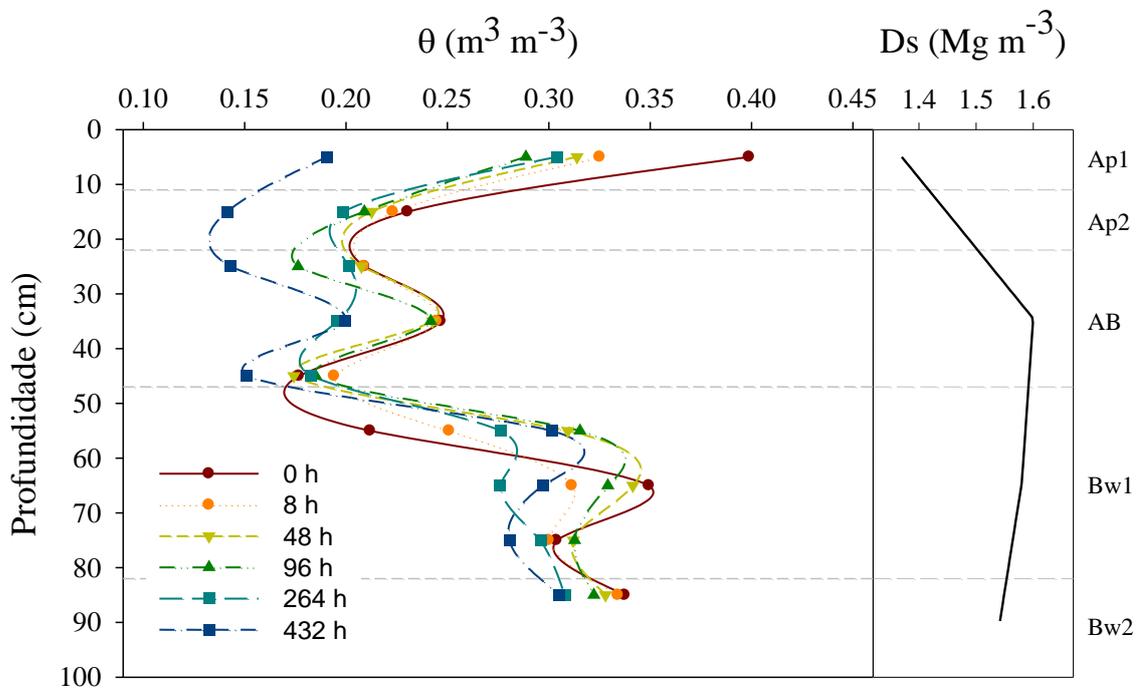
Figura 18. Perfil de redistribuição de água no solo após uma irrigação de 32,96 mm na fase fenológica intermediária.



Fonte: Autor, 2014

Um período seco de 26 dias foi escolhido após uma chuva de 37,60 mm para se observar a distribuição hídrica no perfil do solo para a terceira fase fenológica, estando ilustrado na Figura 19. Nessa fase, o sistema radicular se encontra plenamente desenvolvido e, como consta na Figura 9, alcançou 0,4 m de profundidade máxima. Por essa fase estar num período chuvoso, a umidade no solo mantém-se acima do ponto de mucha na maior parte do tempo. A maior variação de umidade ocorre na camada superficial, mas pode-se notar o efeito da absorção de água pelo sistema radicular a partir da diminuição do conteúdo de água até a profundidade de 0,4 m. A característica de distribuição hídrica que mais chama atenção nessa figura é o aumento significativo no teor de umidade do solo na camada de 0,5 a 0,6 m. Como fora dito antes, o teor de argila nessa camada é o maior registrado para o perfil do solo, sendo de 54% e juntamente com a densidade de aproximadamente $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ pode-se afirmar que nessa camada há um horizonte coeso (MOREAU et al., 2006), que fica evidenciado por reter a água que está sendo drenada, observado o aumento de $0,2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ nas primeiras 96 horas após o evento de chuva, há uma diminuição nessa quantidade de água quando o tempo após a chuva é de 264 horas e um pequeno aumento às 432 horas. Esses dois últimos pontos observados são semelhantes tanto para a camada 0,5-0,6 m como para a camada 0,6-0,7 m.

Figura 19. Perfil de redistribuição de água no solo após um evento de chuva de 37,6 mm na fase fenológica de crescimento

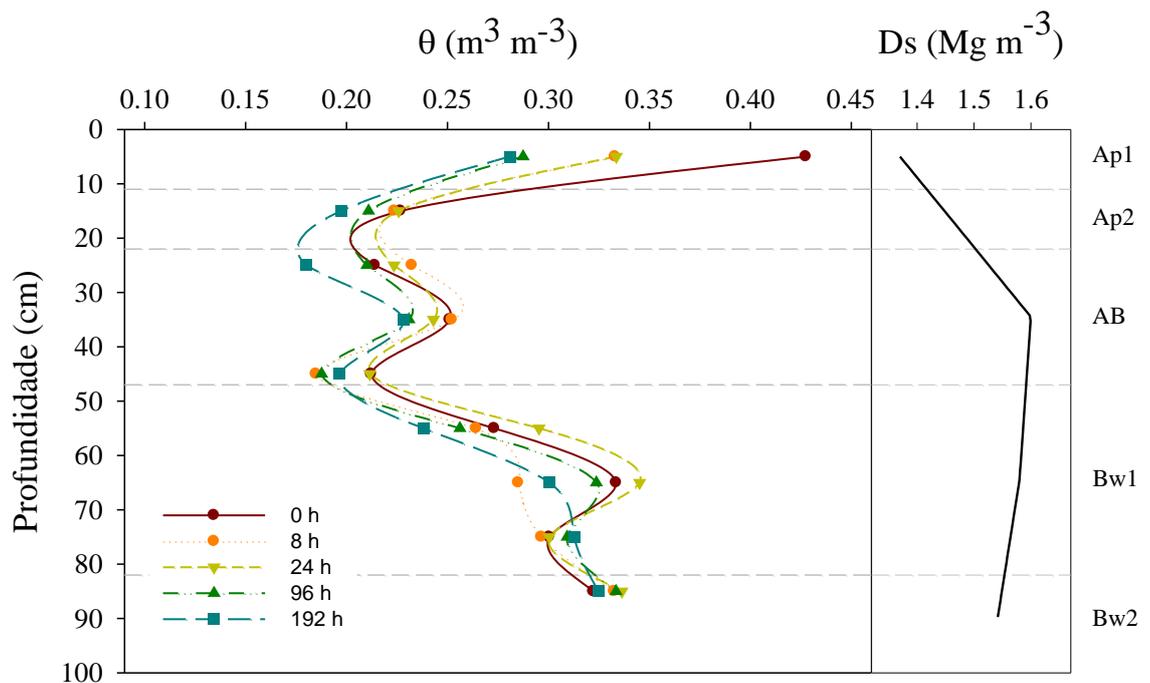


Fonte: Autor, 2014

CARVALHO (2003) já havia determinado que a presença de horizontes coesos nos solos dos tabuleiros costeiros da região de Rio Largo interfere na drenagem do local, ao passo que por estar em profundidade acima de 0,7 m, deixa um volume de solo que é significativo para o desenvolvimento do sistema radicular.

A figura 21 mostra o processo de distribuição hídrica para o perfil do solo na fase fenológica final, após um evento de 80,51 mm de chuva. Nesse ponto que sucedeu um período chuvoso, o solo encontra-se com um bom armazenamento de água. Como explicado por CARVALHO (2003), a presença de um horizonte coeso cria um lençol freático suspenso, que está fornecendo água para o sistema radicular provavelmente por ascensão capilar.

Figura 20. Perfil de redistribuição de água no solo após um evento de chuva de 80,51 mm na fase fenológica final

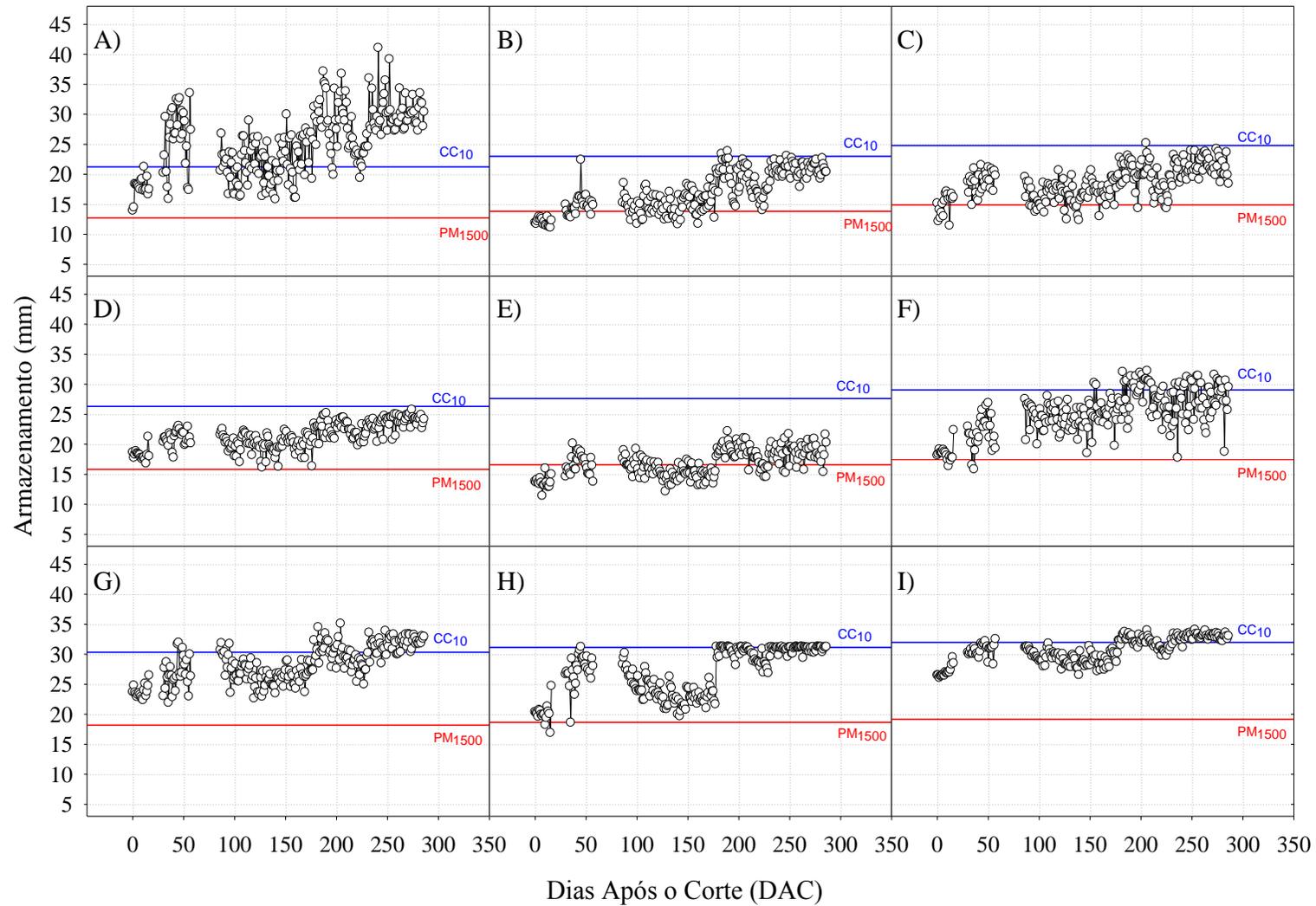


Fonte: Autor (2014)

4.4- Armazenamento de água no solo

A Figura 21 mostra a variação no armazenamento por perfil do solo em escala diária para o período do ciclo da cultura em que o TDR esteve instalado. A maior variação foi na camada superficial de 0 a 0,1 m (Figura 22 a), que recebe diretamente a água da precipitação e da irrigação, e tem como componentes de saída no balanço hídrico além da absorção de água

Figura 21. Variação no armazenamento de cada camada do perfil do solo, em escala diária, durante o período de medidas do TDR. Camada de 0-0,1 m (a); 0,1-0,2 m (b); 0,2-0,3 m (c); 0,3-0,4 m (d); 0,4-0,5 m (e); 0,5-0,6 m (f); 0,6-0,7 m (g); 0,7-0,8 m (h); 0,8-0,9 m (i).



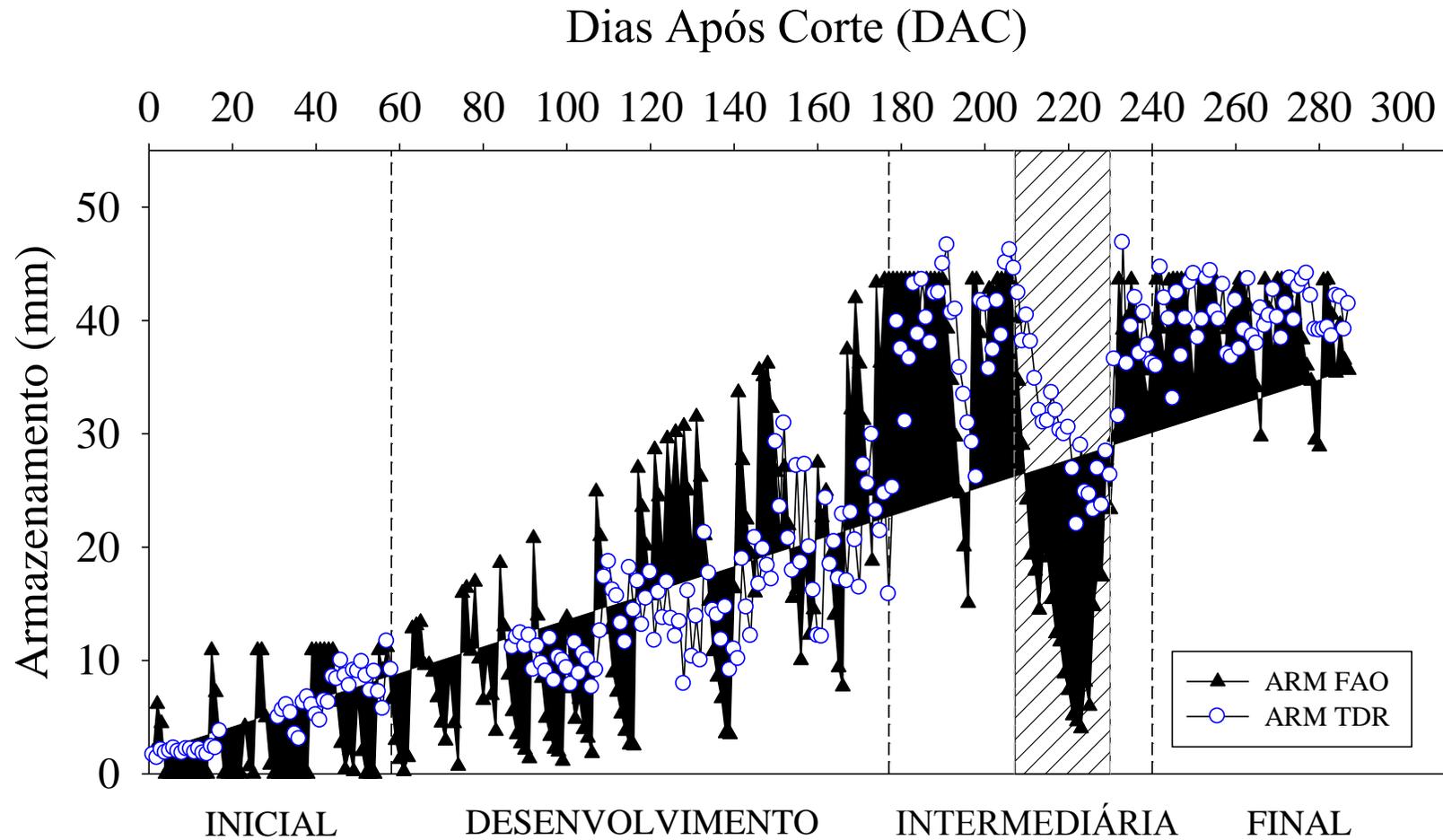
Fonte: Autor (2014) | **Nota:** As linhas de referência indicam o armazenamento na capacidade de campo (azuis) e ponto de murcha (vermelhas).

pelas raízes (uma vez que a maior concentração radicular foi nesta camada) a evaporação direta do solo à atmosfera.

Essa camada faz parte do horizonte Ap1, com uma densidade de $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$, 61% de areia total contra 32% de argila, características essas que conferem a menor água disponível (AD) entre os horizontes ($0,083 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). As camadas 0,1-0,2 m (Figura 22 b) e 0,2-0,3 m (Figura 22 c) mantiveram uma variação no armazenamento semelhante para o período, com armazenamento entre 10 e 25 mm. As características físicas dessas camadas são semelhantes (Figura 4), pois encontram-se no horizonte Ap2, cuja AD foi de $0,092 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e na transição entre o Ap2 e o AB, cuja AD foi de $0,104 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A camada de 0,3-0,4 m, 0,4-0,5 m também apresentaram semelhança na variação do armazenamento durante o ano, visto que se encontram em sua maioria no horizonte AB, com CAD de 0,104. A Figura 21f representa a camada inicial do horizonte Bw1 e apesar de alcançar os maiores valores de armazenamento subsuperficial, em torno de 32 mm, apresenta também a maior amplitude na variação desse armazenamento, com um valor mínimo aproximado de 16 mm. O horizonte BW1 é característico por conter o maior teor de argila entre os estudados, com 54% e a menor quantidade de areia total, com 44%, a densidade é de $1,58 \text{ g cm}^{-3}$. Observando as camadas de 0,6-0,7 m e de 0,7-0,8 m pode-se notar que o comportamento é semelhante a de 0,4-0,5 m no que tange o máximo de água armazenado, pois as mesmas encontram-se no horizonte BW1, porém, a amplitude de variação no armazenamento para a camada 0,4-0,5 m é singular, justificado apenas por uma camada mais densa que retenha a água que entra no sistema com mais força que as camadas superiores, de modo que essa água possa ser extraída dessa camada por ascensão capilar. CARVALHO (2003) observou que o horizonte coeso, no caso um duripã, é responsável por reter a água drenada num lençol freático suspenso no período chuvoso, o que o torna um reservatório de água.

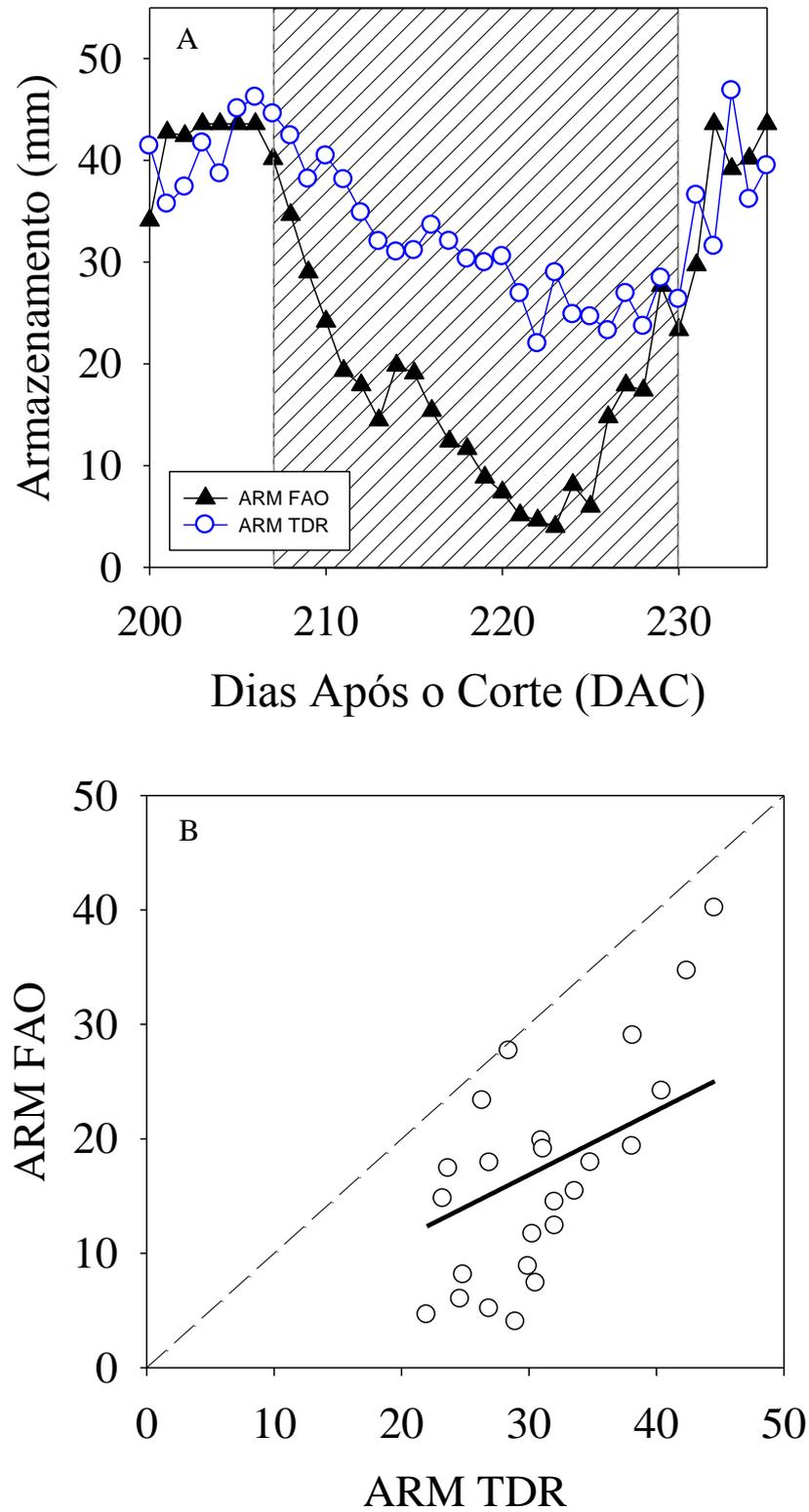
A Figura 22 mostra um comparativo entre o armazenamento de água no solo estimado pelo método FAO 56 e o medido através do TDR, para uma profundidade do sistema radicular máxima de 0,4 m no período em que o TDR esteve instalado em campo. Pode-se notar que durante o período, as medidas do TDR estão sempre diferentes das estimativas da FAO, evidenciando que há pouca ou nenhuma correlação entre os dois métodos. Observa-se ainda que o método FAO é muito mais sensível às mudanças no armazenamento diante de variações na precipitação e irrigação que o TDR, dada a amplitude de variação do método FAO (Figura 23A). No único período onde houve uma certa correlação entre o TDR e o método FAO (Figura 23B), o método FAO subestimou em 44% a medida do TDR, através de uma curva com ajuste linear e R^2 de 0,37 (Figura 23 C). Esse comportamento inercial dos dados de umidade medidos

Figura 22. Variação no armazenamento, em escala diária estimado pelo método do boletim FAO 56 e medido pelo TDR durante o período em que o TDR esteve instalado no campo. A área hachurada destaca o período onde houve maior semelhança entre os dados estimados e observados.



Fonte: Autor (2014)

Figura 23. A) Série destacada na Figura 23, mostrando a relação entre o armazenamento estimado pelo método FAO 56 e observado pelo TDR; B) Comparação entre os dados estimados pela FAO 56 e observados pelo TDR

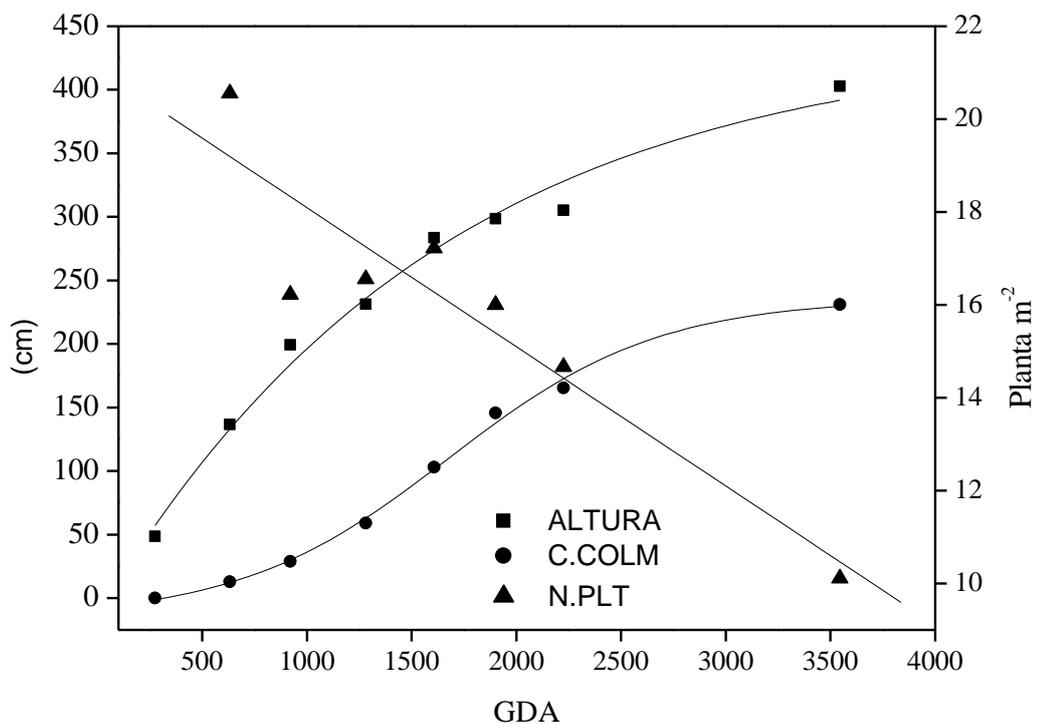


pelo TDR está concatenado à presença do horizonte coeso, que está retendo parte da água que entra no sistema e disponibilizando a mesma para o sistema radicular, através de ascensão capilar.

4.5- Variáveis de crescimento da cultura

A Figura 24 mostra os indicadores de crescimento altura e comprimento de colmo, ajustados pelo modelo sigmoidal de Boltzmann e o número de plantas por metro quadrado, que foi suficientemente estimado pelo modelo linear, variando nos graus dia acumulados (GDA).

Figura 24. Altura, comprimento do colmo (C. COLM) e número de plantas por metro quadrado (N.PLT) em função dos graus-dia acumulados com temperatura base de 16 °C.



Fonte: Autor, 2014

Para a altura do dossel, o modelo foi satisfatório, com um coeficiente de determinação de 0,987. A cultura manteve o crescimento durante todo o ciclo, alcançando uma altura máxima de 402 cm na última observação. Não foi possível seguir com a biometria até o final do ciclo, pois houve tombamento da cultura após uma chuva considerável, o sistema radicular superficial pode ter contribuído para esse tombamento. O comprimento do colmo também se manteve em crescimento até o final do experimento, sendo bem ajustado pelo modelo de Boltzmann dado

seu coeficiente de determinação alto, com valor de 0,997. O máximo comprimento foi observado na biometria final, tendo alcançado valor de 231 cm aos 401 DAC (3545, 73 GDA). O número de plantas por metro quadrado diminui linearmente durante o ciclo da cultura, tendo seu máximo observado aos 77 DAC (631,71 GDA), sendo de 20,55 plantas m², e seu mínimo na última observação biométrica, chegando a 10,11 plantas m².

Tabela 7. Coeficientes de ajuste da equação de Boltzman para altura do dossel e comprimento do colmo

Parâmetro	Altura do dossel (cm)		Comprimento do colmo (cm)	
	Valor	Erro ¹	Valor	Erro ¹
A1	-5779,5	1,13E5	-15,568	9,97
A2	438,74	84,9	235,45	7,57
X0	-3873,8	3,37E4	1674,5	55,1
dx	1520,7	1,68E3	500,93	59,8
R ²	0,987	-	0,997	-

¹Erro padrão da estimativa

Fonte: Autor (2014)

Tabela 8. Coeficientes da regressão linear, do tipo $y = a + bx$, ajustada aos graus dia acumulados, para a variável número de plantas por m²

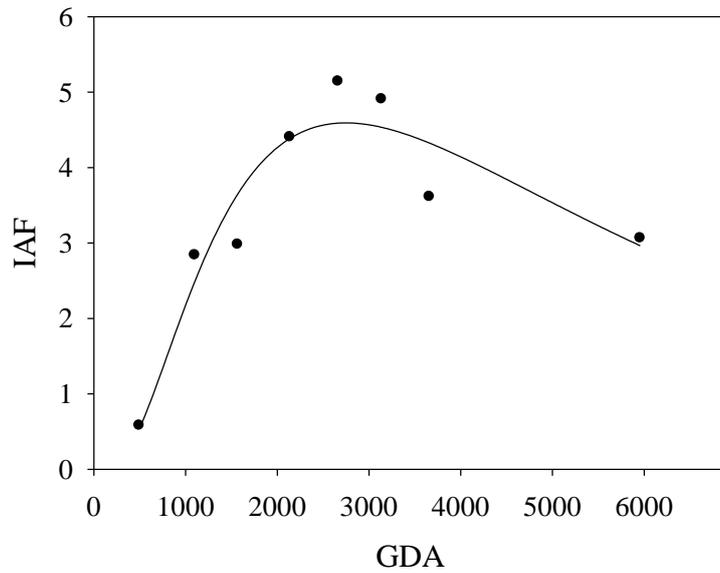
Parâmetro	Valor	Erro ¹
a	21,089	0,8561
b	-0,003	0,0005
R ²	0,8661	

¹Erro padrão da estimativa

Fonte: Autor (2014)

A Figura 25 mostra a variação do índice de área foliar em função dos graus dia acumulados (GDA) ajustados ao modelo log normal.

Figura 25. Variação no IAF em função dos graus dia acumulados para o ciclo da cultura



Fonte: Autor (2014)

Tabela 9. Parâmetros da equação modelo log normal para o índice de área foliar ajustado pelos graus dia acumulados (GDA)

Parâmetro	Valor	Erro ¹
a	4,5922**	0,2886
b	0,8267**	0,1133
X0	2748,0127**	252,8949
R ²	0,9472	

5- CONCLUSÕES

O ajuste das equações de calibração variou para cada camada de solo, visto o perfil ser heterogêneo e haver alteração na composição granulométrica ao longo desse. A calibração do TDR é indicada de maneira individual para cada região e tipos de solo diversos.

Não é possível determinar uma equação que seja universal para um perfil de solo heterogêneo; as equações de Topp e Ledieu não são aplicáveis às condições de solo da região de Rio Largo – AL.

A distribuição de umidade no solo mostrou que a presença de um horizonte coeso interfere na drenagem e fornece água à cultura através de ascensão capilar, devido ao lençol freático suspenso criado acima desse horizonte coeso.

O armazenamento estimado pelo método da FAO não se aplica às condições de solo da região de Rio Largo – AL, uma vez que não considera as características particulares de cada solo, mas sim, um perfil homogêneo.

REFERÊNCIAS

ADAMS, J. E.; ARKIN, G.F. A light interception method for measuring row crop ground cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.1, p.789-792, 1977.

ALLEN et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.1998, 300p.

ARAÚJO NETO, R. A. **Métodos para determinar a evapotranspiração real da cana-de-açúcar**. 79 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias. 2013.

CAMPBELL, G. S.; DIAZ, R. Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration. p. 15-26 *In* BIDINGER, F. R.; JOHANSEN, C. (ed.). **Droughtresearchpriorities for the dryland tropics**. ICRISAT, India, 1988.

CARVALHO, O. M.. **Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo – AL, cultivados com cana-de-açúcar**. 74 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias. 2003.

CECÍLIO, R. A. SANTOS, D. B. Metodologia de calibração de equipamento de TDR para determinação da umidade do solo. **Engenharia Ambiental**. v. 6. n. 3. p. 524-533. 2009.

CHAMPAGNE, C. **Evaluation of agricultural soil moisture extremes in Canadá using passive microwave remote sensing**. 2011. 121 p. Tese (PhD). The Faculty of Graduate Studies of The University of Guelph. 2011.

COELHO et al. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, p. 23-30. 2006

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 9, n. 4, p. 475-480, 2005.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Série histórica de produtividade da cana de açúcar: safra de 2005/06 a 2013/14**. Página da internet. Disponível em <www.conab.gov.br> Acesso em 21/03/2014.

COSTA, G. A. **Avaliação da disponibilidade hídrica para o milho na região de Rio Largo – AL**. 21 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias, 2003.

DAROS, E. et al. **Liberação Nacional de novas variedades RB de cana-de-açúcar**. Curitiba, 2010, 64p.

EVETT, S. R. et al. Single- and dual-surface iterative energy balance solutions for reference ET. **Transactions of the ASABE**.v. 55(2), p. 533-541. American Society of Agricultural and Biological Engineers.2012.

FARIAS, C. H. et al. Crescimento do sistema radicular de cana-de-açúcar submetida a lâminas de irrigação: modelo geoespacial e influências na produtividade da cultura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.4, n.4, p.186–196, 2010.

FERREIRA JUNIOR, R. A. **Crescimento de variedades RB de cana-de-açúcar irrigadas e fotossíntese modelada pela radiação solar**. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2010.

FERREIRA JÚNIOR, R. A. **Crescimento, eficiência no uso da radiação e energia de biomassa em cana-de-açúcar irrigada**. 72 p. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas. 2013.

GHIBERTO, P. J. et al. Components of the water balance in soil with sugarcane crops. **Agricultural Water Management**. v. 102, p. 1-7. 2011.

GRAYSON, R. B.; WESTERN, A. W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response. **Journal of Hydrology**, v. 207, p. 68-82, 1998.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcoleiros do Brasil - STAB**, Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

HILLEL, D. KRENTOS, V. D. STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics *in situ*. **Soil Science**. v. 114, n. 5. P. 395-400. 1972.

HOEKSTRA, P. DELANEY, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. **Journal of Geophysical Research**. v. 79, p. 1699–1708. 1974.

JADOSKI, C. J. et al. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**. v. 3, n. 2. 2010.

KLAIJ, M. C., VACHAUD, G. Seasonal water balance of a sandy soil in Niger cropped with pearl millet, based on profile moisture measurements. **Agricultural Water Management**. v. 21, p. 313-330, 1992.

LACERDA, R. D. et al. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 5, n. 1, 2005.

LEDIEU, J. DE RIDDER, P. DE CLERCK, P. DAUTREBANDE, 1986 A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**. v. 88, p. 319-328. 1986.

MASTRORILLI, M. et al. Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 90, p. 81-89, 1997.
measurements in coaxial transmission lines. **Water resources Research**, Washington, v.16, n.3, p.574-582, 1980.

MEDEIROS, R. P. **Componentes do balanço de água e de radiação solar no desenvolvimento do milho, em quatro épocas de semeadura, no agreste de Alagoas**. 88 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas – Centro de Ciências Agrárias. 2009.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Cana-de-açúcar**. Página da internet. Disponível em <www.agricultura.gov.br> Acesso em 21/03/2014.

MOREAU, A. M. S. S. Gêneses de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Bras. Ciência do Solo**. v. 30, p. 1021-1030. 2006

PONIZOVSKYA, A. A. CHUDINOVA, S. M. PACHESPSKY, Y. A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. **Journal of hydrology**, v. 218. p. 35-43. 1999.

REICHARDT, K., TIMM, L. C. **Solo Planta Atmosfera – Conceitos Processos e aplicações**, São Paulo: Manole, 2 ed. 524 p. 2012.

RITCHIE, J. T. Soil water availability. **Plant and Soil**. v. 58, p. 327-338, 1981.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia de cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociência. Apostila, 1995. 101p.

SILVA, A. J. P. **Estimacao da percolação em lisímetros de drenagem e evapotranspiracao da bananeira usando TDR**. 108 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Recôncavo Da Bahia – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. 2013.

SILVA, F. F. et al. Measuring water contentf soil substitutes with time-domain reflectometry (TDR). **J. Amer. Soc. Hort. Sci**. v. 123 (4). p. 734-737. 1998.

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

SOUSA, A. C. M. et al. Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluent application by subsurface drip system. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 33, n.4, p.647-657, 2013.

SOUZA, J. L. NICÁCIO, R. M. MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurement in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, p. 1203-1220. 2005.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: avaliação do modelo MOSICAS**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2006.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).

TOMASELLI, J. T. G. BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesq. Agropec. Bras.** v. 36, n. 9, p. 1145-1154. 2001.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content:

VAN BAVEL, E. H. M. STIRK, G. B. BRUST, K. J. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots. I: Interpretation of water content and pressure profiles. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** v. 32, p. 310-317. 1968a.

VAN BAVEL, G. B. BRUST, K. J. E. H. M. STIRK. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots. II: The water balance of root zone. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** v. 32, p. 317-321. 1968b

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